

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra výrobních strojů a konstruování



Vliv vibrací na teplotu kluzných ložisek  
The Influence of Vibrations on the Temperature  
of the Sliding Bearing

Studentka:

Bc. Gabrhelová Lucie

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Mečislav Hudeczek, Ph.D.

Ostrava 2009

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

**Prohlašuji, že:**

- jsem byla seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB–TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB -TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

Adresa trvalého pobytu studenta:

Gabrhelová Lucie

Nádražní 1786/14

785 01 ŠTERNBERK

### **Poděkování**

Při dokončení diplomové práce bych chtěla hlavně poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Mečislavovi Hudeczkovi, Ph.D a konzultantovi panu Ing. Jaroslavovi Bryhcymu za metodickou pomoc, rady a poskytnutí podkladů při zpracování diplomové práce.

Dále bych chtěla poděkovat zaměstnancům firmy HUDECZEK Service, s.r.o. za ochotu, poskytnutí informací a vědomostní přínos mé osobě.

## Obsah

1	Úvod .....	8
2	Konstrukce kluzných ložisek .....	9
2.1	Rozdělení kluzných ložisek .....	10
2.1.1	Hydrodynamická ložiska .....	12
2.1.2	Hydrostatická ložiska .....	12
2.2	Charakteristiky měřených ložisek .....	13
3	Nasazení multiparametrické diagnostiky v diagnostice kluzných ložisek .....	15
3.1	Tribologie kluzných ložisek .....	15
3.2	Dělení kluzného tření .....	16
4	Mazací soustavy pro mazání kluzných ložisek .....	18
4.1	Krátkodobé mazací olejové soustavy .....	18
4.2	Dlouhodobé mazací olejové soustavy .....	18
4.3	Oběhové mazání .....	19
5	Vibrodiagnostika strojů uložených v kluzných ložiskách .....	20
5.1	Základní principy vzniku chvění .....	20
6	Hodnocení stavu stroje na základě analýzy spekter vibrací .....	27
6.1	Diagnostický systém měření vibrací na kluzných ložiscích .....	27
6.1.1	Měřicí přístroj ADASH A 4300 – VA 3 .....	28
6.1.2	Volba snímače vibrací .....	30
6.2	Volba časového okna .....	32
6.3	Volba měřících míst a uchycení snímačů .....	32
6.3.1	Vliv prostředí na snímaný signál .....	34
6.3.2	Citlivost a frekvenční rozsah .....	34
6.4	Vliv uchycení snímače na citlivost snímaného signálu .....	36
7	Měření teplot a teplotních polí pomocí termokamery .....	38
7.1	Princip Termovize .....	38
7.2	Zásady správného termovizního snímání .....	40
7.3	Technické údaje Ti45 IR FlexCam® .....	40
7.4	Emisivita .....	42
7.5	Faktory potřebné k nastavení termokamery .....	43

---

8	Měření a zpracování dat měření .....	45
8.1	Teplotní bilance kluzného ložiska.....	47
8.2	Analýza dat vibrací.....	49
8.2.1	Vyhodnocování dat vibrací .....	49
8.3	Analýza teploty .....	50
8.3.1	Vyhodnocování termovizních snímků .....	50
8.4	Zjišťování závislosti vibrací na teplotě .....	52
8.5	Vyhodnocení závislosti vibrací na teplotě .....	55
9	Závěr .....	57
10	Použitá literatura.....	59
11	Přílohy .....	60

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Gabrhelová Lucie. *Vliv vibrací na teplotu kluzných ložisek*. Ostrava: Katedra výrobních strojů a konstruování, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007. Diplomová práce, vedoucí: Ing. Mečislav Hudeczek, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá analýzou vlivu vibrací na teplotě kluzných ložisek. V úvodní části jsou uvedené informace o kluzných ložiskách, jejich konstrukce, dělení, údržba a použití.

Dále se v této práci věnuji základním principům diagnostických měření, jako jsou metody vibrodiagnostiky a termovize praktikované na kluzná ložiska.

Závěrečná část je zpracována na základě informací z praxe. Popis měření, analýza dat a závěrečné vyhodnocení závislosti vibrací na teplotě.

## ANNOTATION OF THESIS

Gabrhelová Lucie. *The Influence of Vibrations on the Temperature of the Sliding Bearing*. Ostrava: Department of Production Machines and Design, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2009. Thesis, head: Ing. Mečislav Hudeczek, Ph.D.

This diploma work deal with analysis The Influence of Vibrations on the Temperature of the Sliding Bearing. In introduction part are offered information about sliding bearing, their construction, dividing, maintenance and use.

In the next part of my diploma work I deal the basic principles diagnostic measurement like is vibrodiagnostic methods and thermo vision methods practice on the sliding bearings.

In the final part is accomplished on the basic information from the experiences. Description of the measurement, data analysis and final interpretation of dependency vibration on the temperature.

## Seznam použitých zkratek a značek

$a$	– zrychlení [ $\text{m.s}^{-2}$ ]
$b_i$	– šířka ideální nosné plochy [cm]
$f$	– frekvence [Hz]
$F$	– zatížení ložiska [N]
$F_e$	– pružná síla [N]
$K$	– tuhost pružiny [ $\text{N.m}^{-1}$ ]
$l$	– šířka ložiska [cm]
$l_1$	– šířka kluzné plochy mezi mazací drážkou a čelním okrajem ložiska [cm]
$l_d$	– délka drážky [cm]
$m$	– hmotnost [kg]
$M_e$	– intenzita vyzařování reálného tělesa [-]
$M_{e0}$	– intenzita vyzařování dokonale černého tělesa [-]
$\text{oleje } p_1$	[ $\text{cm}^2$ ]
$p_1$	– tlak oleje v mazací kapse [MPa]
$Q_{\text{hřídelem}}$	– teplo odvedené hřídelí [J]
$Q_{\text{okolí}}$	– teplo okolí [J]
$Q_{\text{vstup}}$	– teplo přiváděné olejem do ložiska [J]
$Q_{\text{výstup}}$	– teplo odváděné olejem z ložiska [J]
RMS	– Root mean square
$S_i$	– průmět zatížené části kluzné plochy čtyřkapsového ložiska, na niž působí plný tlak
$T$	– doba kmitu [s]
$y$	– výchylka [m]
$\Delta Q$	– teplo vzniklé tribologickými procesy [J]
$\varepsilon$	– emisivita [-]
$\varphi$	– středový úhel [ $^\circ$ ]
$\omega$	– omega [ $\text{rad.s}^{-1}$ ]
$\zeta_{H,V,A}$	– součinitel nárůstu teploty ve směrech horizontálním, vertikálním, axiálním [ $^\circ\text{C/mm.s}^{-1}$ ]
$v_{H,V,A}$	– vibrace měřené v horizontálním, vertikálním a axiálním směru [ $\text{mm.s}^{-1}$ ]



## 1 Úvod

Diagnostiku definujeme jako nauku o zjišťování vad a poruch. Jestliže sledovaný objekt, jehož stav se snažíme zjistit, je technického charakteru, potom mluvíme o technické diagnostice.

Technická diagnostika využívá různých fyzikálních vlastností při měření diagnostických parametrů a vyhodnocování různých fyzikálních procesů probíhajících ve strojních systémech. Naměřené a vyhodnocené diagnostické signály nám poskytují informace o objektivním technickém stavu sledovaného objektu.

Důležitým faktorem hospodárného provozu energetických strojů je kvalita uložení jejich rotujících hřídelů. Velké energetické stroje jako jsou parní turbíny, synchronní generátory a podobně jsou většinou uloženy v kluzných ložiskách.

Dodržením předepsaných výrobních a montážních tolerancí a předepsaných provozních podmínek kluzného uložení se dosáhne jak hospodárného provozu stroje, tak i zkvalitnění konečného produktu, pro který byl stroj navržen.

Sledováním provozních parametrů lze pak zjistit prvotní problémy, které doprovázejí stroj při jeho provozování.

Na základě takto získaných údajů a dalších indicií je možné se následně rozhodnout o aplikaci hlubších a komplexnějších diagnostických metod.

Jedním ze sledovaných parametrů v provozu kluzných ložisek je teplota ložiska, respektive teplota oleje v ložisku. Přesáhne-li teplota v ložisku jistou hranici, může dojít nejen k degradaci maziva a znehodnocení jeho mazacích schopností, ale vysoké teploty také nepříznivě ovlivňují vlastnosti ložiskové výstelky. Cílem téhle práce je stanovit závislost vibrací na teplotě kluzných ložisek turbogenerátorů.

## 2 Konstrukce kluzných ložisek

Kluzné ložisko je strojní součást, vymezující vzájemnou polohu dvou stýkajících se částí mechanismu při jejich relativním pohybu. Tento pohyb je doprovázen kluzným třením a opotřebením.

Kluzná ložiska volíme zpravidla tam, kde potřebujeme přenést velmi vysoké zatížení. Jsou vhodná i tam, kde se nevyžaduje mazání (samomazná ložiska).

Druh ložiska volíme zejména podle funkčních a ekonomických požadavků a speciálních požadavků [7].

**Funkční požadavky** – jsou rozhodující u funkčně důležitých a velkých zařízení. Mezi funkční požadavky patří:

- únosnost ložiska
- obvodová rychlost čepu
- ztráty třením
- provozní teplota
- útlum vibrací
- hlučnost
- přípustná nesouosost
- trvanlivost ložiska

**Ekonomické požadavky** – do ekonomických požadavků lze zařadit:

- cena ložiska
- materiálové požadavky
- jakost a množství materiálů
- využití materiálů
- prostorové požadavky
- požadavky na maziva a mazací zařízení
- obsluhovatelnost a udržitelnost ložiska
- možnost opravy a výměny
- trvanlivost ložiska

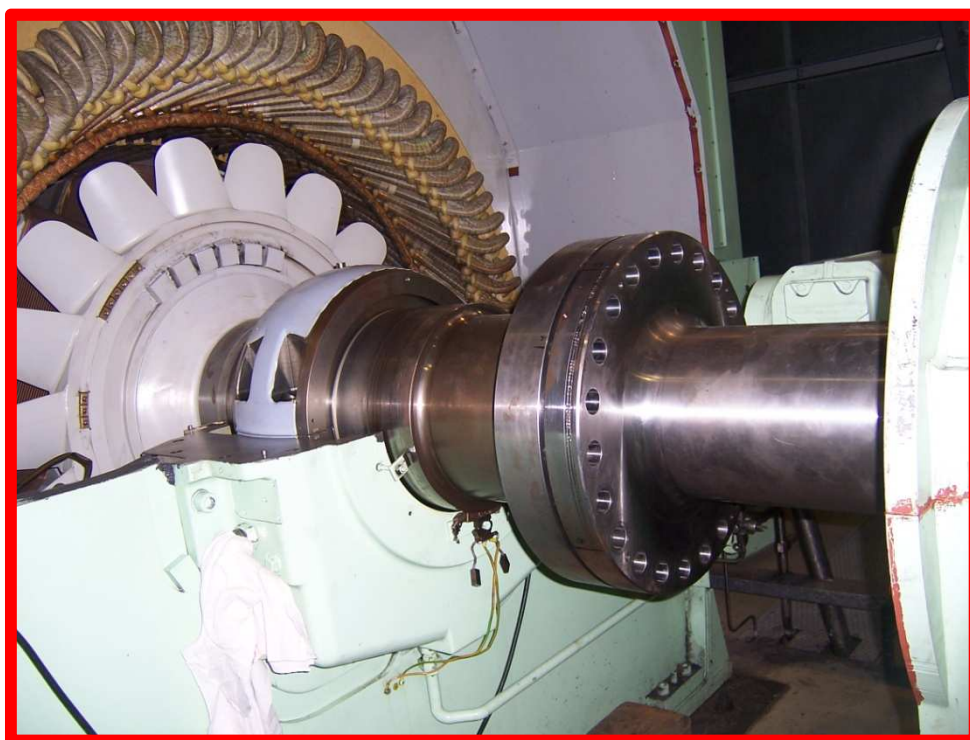
**Speciální požadavky** – jsou různé podle charakteru stroje např.:

- velmi nízká, nebo velmi vysoká teplota okolí
- odolnost proti korozi
- odolnost vůči prašnému prostředí
- nutnost použití speciálních látek jako mazivo (kyseliny, louhy nebo plyny)

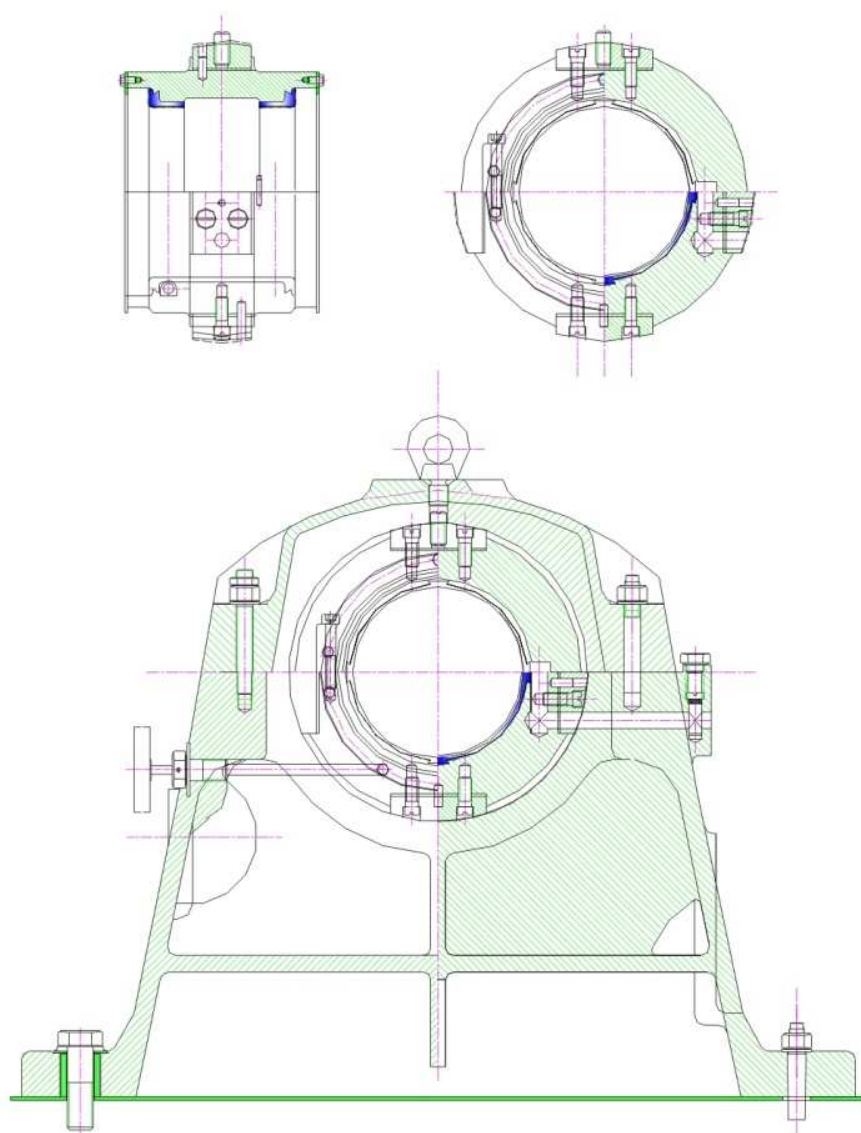
## 2.1 Rozdělení kluzných ložisek

Kluzná ložiska lze rozdělit podle několika kritérií:

- 1) z hlediska působení zatížení lze rozdělit kluzná ložiska na:
  - a) radiální
  - b) axiální
  - c) kombinovaná
  - d) posuvná vedení
- 2) z hlediska časového průběhu síly popřípadě rychlosti
  - a) staticky zatížená
  - b) dynamicky zatížená
- 3) dle smyslu otáčení
  - a) jednosměrná
  - b) obousměrná
- 4) podle typu mazacích soustav
  - a) krátkodobé mazací soustavy (olejnička, kapací, olejová mlha..)
  - b) dlouhodobé mazací soustavy (kroužkové, polštářové, brodicí, rozstřikové...)
  - c) oběhové mazací soustavy (hydrostatické, hydrodynamické)



Obr. 1 Pohled na kluzné ložisko generátoru – 40 MVA, 6kW, 3000 otáček



Obr. 2 Schéma ložiska a ložiskového domku

### 2.1.1 Hydrodynamická ložiska

Mazací olejový film se vytváří v důsledku rotace zatíženého hřídelového čepu, protože mazivo má určitou přilnavost ke kluzným plochám čepu i ložisek, které je rotujícím čepem unášeno a proudí v mazací vrstvě ve směru rotace.

Pokud není hřídelový čep zatížen, je ložisková vůle po celém obvodu stejná, jestliže čep zatížíme určitou silou, posune se ve směru působení této síly a v důsledku otáčení čepu i mírně do strany.

Mazivo, které zůstává na povrchu čepu, je jím unášeno do zužující se mazací vrstvy, ve které se vytváří hydrodynamický tlak, který působí proti zatěžující síle.

Hydrodynamická síla, která vzniká v mazací vrstvě, je tím větší, čím větší je kluzná rychlost [7].

### 2.1.2 Hydrostatická ložiska

Předpokladem správného chodu kluzného ložiska je provoz v oblasti kapalinného tření. Aby byla zajištěna tato podmínka, je nutné provést výpočet potřebných veličin a zajistit jejich dodržování v daných mezích. Výhodou hydrostatických ložisek je, že nedochází k žádnému kontaktu hřídele a pouzdra, což vykazuje nepatrné opotřebení, dále u těchto ložisek je tichý chod, který zajišťuje olejová vrstva tlumící kmitání [7].

#### Výpočet hydrostaticky zatížených ložisek

Hydrostaticky mazaná ložiska se uplatňují v aplikacích kdy kluzná rychlost ložiskového čepu je příliš malá nebo zatížení ložiska je vzhledem k otáčkám poměrně velké. Základem hydrostatického mazání je přivést mazivo pod dostatečně velkým tlakem do jednoho nebo více míst, čímž se vytvoří dostatečně silná mazací vrstva [3].

#### Parciální ložiska

Tento typ ložiska se používá tam, kde se směr zátěžné síly nemění nebo je skoro neměnný. Mazací tlakový olej se přidává do mazací drážky v zatížené části kluzné plochy ložiska.

Průmět kluzné plochy ložiska  $Dl$  můžeme nahradit ideální nosnou plochou  $S_i$ , na niž by působil plný tlak oleje v mazací drážce  $p_l$ , to je tlak za reduktorem.

Velikost určíme

$$S_i = \frac{F}{p_1} = b_i \quad (2.1)$$

Šířce  $b_i$  ideální plochy  $S_i$  odpovídá středový úhel  $\varphi$ .

Za předpokladu přímkového poklesu tlaku ve směru osy ložiska je délka ideální nosné plochy  $l_i$  dána vztahem

$$l_i = l_d + \frac{1}{2}(l - l_d) = \frac{1}{2}(l + l_d) \quad (2.2)$$

Tlak oleje  $p_l$  v mazací drážce klesá jak k bočním hranám pánve, tak k čelním okrajům až na atmosférický tlak. Rozšířením plochy mazací drážky se zvětší i ideální nosná plocha  $S_i$ , tudíž pro dané zatížení ložiska  $F$  stačí menší tlak oleje  $p_l$ , přitom vzrůstá množství oleje protékající ložiskem  $Q$ .

Ložiskem protéká olej ve směru osy ložiska, tj. k čelním hranám, a ve směru obvodu k bočním hranám.

Ve směru osy ložiska uvažujeme průtok oleje spárou, jejíž šířka se rovná délce oblouku o středovém úhlu  $\varphi$ . Délka zmiňované spáry  $l_1$  se určí z výrazu

$$l_1 = \frac{1}{2}(l - l_d) \quad (2.3)$$

## 2.2 Charakteristiky měřených ložisek

Na měřených strojích jsou hydrostatická (generátor) i hydrodynamická (turbína) kluzná ložiska.

Ložiska jsou zatížena staticky a to jak k působícím silám, tak i k otáčkám.

Ložisko se skládá z děleného ložiskového domku, děleného tělesa ložiska opatřeného ložiskovou výstelkou

Těleso ložiska je od ložiskového stojanu odizolováno.

Mezi průměrem výstelky a průměrem rotorové hřídele je povolena radiální vůle minimálně 0,34 mm a maximálně 0,45 mm. Na ložiskách jsou nastaveny hodnoty alarmů výstrahy na hodnotu 85°C a alarm vypnutí je nastaven na hodnotu 95°C.

Výrobce stanovuje maximální předepsané hodnoty vibrací a hodnoty alarmů dle níže uvedených tabulek. Hodnoty jsou z technických podmínek turbogenerátoru.

Tab. 1 Normální a dovolené hodnoty na zkušebně dodavatele generátoru

Ložiska								
	Vertikálně i horizontálně				Osově			
	(mm/s) ef	in/sec ef	μm rozkmít	(mills) rozkmít	(mm/s) ef	in/sec ef	μm rozkmít	(mills) rozkmít
1) Normální	< 1,8	< 0,07	< 25,4	< 1,0	< 2,8	< 0,1	< 35,6	< 1,4
2) Trvalé	< 4,5	< 0,18	< 63,5	< 2,5	< 7,0	< 0,28	< 99,1	< 3,9
Alarm	4,5	0,18	63,5	2,5	7,0	0,28	99,1	3,9
Vypnutí	8,0	0,32	111,8	4,4	15,0	0,59	236,2	9,3

Tab. 2 Normální a dovolené hodnoty v provozu

Konstrukce mimo krycí plechy								
	Vertikálně i horizontálně				Osově			
	(mm/s) ef	in/sec ef	μm rozkmít	(mills) rozkmít	(mm/s) ef	in/sec ef	μm rozkmít	(mills) rozkmít
1) Normální	< 4,5	< 0,18	< 63,5	< 2,5	< 4,5	< 0,18	< 63,5	< 2,5
2) Trvalé	< 7,0	< 0,28	< 99,1	< 3,9	< 11	< 0,43	< 154,9	< 6,1
Alarm	7,0	0,28	99,1	3,9	11,0	0,43	154,9	6,1
Vypnutí	15,0	0,59	210,8	8,3	20,0	0,79	281,9	11,1

Ložisko je mazáno olejem typu 7 1201-302(Oil 7071) ISO VG 46 s viskozitou  $46 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  při  $40^\circ\text{C}$  a (28 při  $50^\circ\text{C}$ ). Celkový průtok oleje je 70 litrů za minutu a tlak oleje je 150 kPa. Zdvíhací tlak oleje je 6 MPa.

### 3 Nasazení multiparametrické diagnostiky v diagnostice kluzných ložisek

Základem každého určení zbytkové životnosti je objektivní znalost technického stavu sledovaného objektu s co největší jistotou rozhodnutí.

Multiparametrická diagnostika umožní odhalit závady nezjistitelné při používání pouze jedné diagnostické metody.

Multiparametrický přístup k provozní diagnostice spočívá v použití několika měřících, respektive diagnostických metod, což umožňuje nejen zvýšení jistoty rozhodnutí o technickém stavu, ale zároveň zlepšuje detekci a diagnostiku závad v nasazení vhodných metod technické bezdemontážní diagnostiky.

Na měřených strojích se provádí diagnostická měření ve dvou fázích.

- 1) provozní diagnostika (parametrická diagnostika) – sledování provozních parametrů (otáčky, teploty, celkové hodnoty vibrací, tlaky mazání...)
- 2) diagnostika provedená diagnostickým úsekem společnosti Arcelor Mittal případně externí společností (Outsourcingovou firmou) - frekvenční analýza, termovizní měření, rozborů olejů apod.

#### 3.1 Tribologie kluzných ložisek

Tribologie je věda zkoumající chování dvou povrchů, vzájemně se dotýkajících při relativním pohybu. Na základě tribologických zkoušek se provádí:

- stanovení degradace mazacích olejů
  - a) kinematická viskozita
  - b) bod vzplanutí
  - c) obsah vody
  - d) číslo alkality a kyselosti
  - e) celkové znečištění
- stanovení míry opotřebení kluzných ploch ložisek
  - a) částicová analýza (fetografie)
  - b) spektrofotometrie (absorpční, emisní)



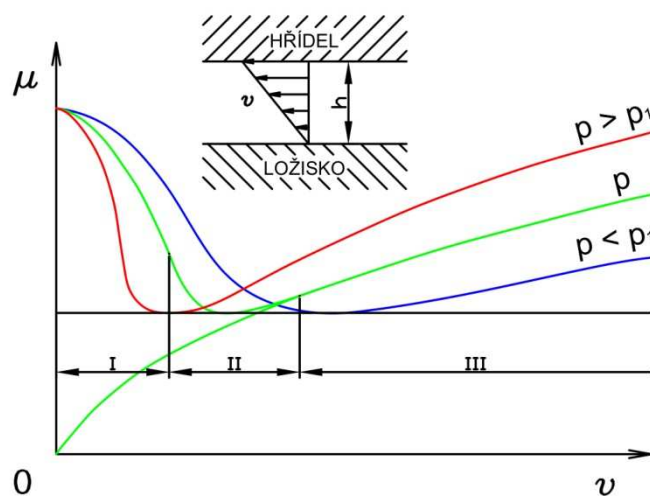
**Tribotechnickou analýzou lze zjistit:**

- poškození valivých a kluzných ložisek
- poškození ozubených kol
- stav kvality mazacích tuků a mazacích olejů

Bereme-li v úvahu všechny provozní stavy stroje uloženého v kluzných ložiskách, může mezi styčnými plochami výstelky a čepu ložiska (v závislosti na způsobu mazání a konstrukci ložiska) dojít k několika třecím stavům, které popisuje Stribeckův diagram.

**3.2 Dělení kluzného tření**

0. Hraniční tření – se vyskytuje těsně při rozběhu stroje, kdy ještě nejsou dostatečně promazané styčné plochy kluzných ložisek. Tento jev by měl být co nejkratší a u větších strojů by se neměl vyskytovat vůbec.
- I. Suché tření – pohyb kluzných ploch bez maziva. Součásti se vzájemně dotýkají (není mezi nimi mazivo) dochází k uvolňování malých částeczek materiálu, vzniká otěr. Nebezpečí zadření. Součinitel smykového tření: 0,1 až 0,2.
- II. Smíšené tření – pohyb kluzných ploch s nedostatečnou tloušťkou vrstvy maziva. K jevu dochází při malých kluzných rychlostech (rozběh stroje) a v samomazných ložiskách. Součinitel smykového tření: 0,01 až 0,1.
- III. Tekutinové tření – kluzné plochy jsou úplně odděleny vrstvou maziva. Součinitel smykového tření: 0,001 až 0,01.



Obr. 3 Průběh Stribeckova diagramu

Tření je závislé na drsnosti povrchu kluzných ploch, měrného zatížení, kluzné rychlosti a teplotě ložiska. Příznivého koeficientu tření se dosáhne, když je měrné zatížení velké a kluzná rychlost nízká. Tuto skutečnost obecně potvrzuje následující tabulka.

Při teplotách asi do 100°C koeficient tření mírně klesá. Jakmile však teplota překročí 100°C, může dojít až k 50% zvýšení uvedených hodnot.

Tab. 3 Tabulka závislosti koeficientu tření na měrném zatížení a kluzné rychlosti čepu

Měrné zatížení p (N.mm <sup>-2</sup> )	Kluzná rychlost v (m.s <sup>-1</sup> )	Koeficient tření (-)
250 - 140	do 0,001	0,03
140 - 60	0,001 - 0,005	0,04 - 0,07
60 - 10	0,005 - 0,050	0,07 - 0,10
10 - 1	0,050 - 0,500	0,10 - 0,15
1	0,500 - 2,000	0,15 - 0,25

Třecí ztráty v oblasti mezního tření jsou vyšší přibližně o jeden řád a v oblasti suchého tření o dva řády než při tření kapalném. Opotřebení kluzných ploch se v jednotlivých oblastech liší o několik řádů.

- Podle druhu pohybu: otáčivý – radiální, axiální a kombinovaný, posuvný
- Podle smyslu působení síly – jednosměrná a obousměrná
- Podle časového průběhu síly, popř. rychlosti – staticky zatížená, dynamicky zatížená

## 4 Mazací soustavy pro mazání kluzných ložisek

Mazací soustava představuje souhrn zařízení pro dopravu maziva do mazacího místa. Tato zařízení mohou být velmi jednoduchá.

Mazací soustavu volíme především podle druhu a potřebného množství maziva, které vyplývají z pracovních podmínek mazané části stroje, dále podle provozních podmínek stroje, nároků na jeho kontrolu, obsluhu a životnost [6].

Obecně lze rozdělit mazací soustavy do třech kategorií.

- 1) Krátkodobé mazací soustavy
- 2) Dlouhodobé mazací soustavy
- 3) Oběhové mazací soustavy

### 4.1 Krátkodobé mazací olejové soustavy

Tyto soustavy zahrnují mazací zařízení pro krátkodobé mazání olejem. Projde-li olej mazacím místem, odkapává a nevrací se již zpátky do mazaného místa. Maže se tedy neustále čerstvým olejem, což je z hlediska spotřeby a nákladů velmi nevýhodné.

Krátkodobé mazání neklade nároky na trvanlivost mazacího oleje, poněvadž namáhání oleje jak mechanické, tak i chemické je velmi omezené. Nejjednodušším způsobem mazání v krátkodobých soustavách je mazání beztlakové[6].

- a) mazání olejnicí
- b) mazání olejovou mlhou
- c) ruční tlakové mazání
- d) mechanické tlakové mazání

### 4.2 Dlouhodobé mazací olejové soustavy

Dlouhodobé mazání je takový způsob mazání, který bez vnějšího zásahu zajišťuje, aby se olej po projití mazaným místem po určité době do tohoto místa vrátil. Mazacího oleje se v tomto případě využívá nepřetržitě až do přípustného stavu zestárnutí. Tenhle způsob mazání je velmi hospodárný z hlediska spotřeby oleje, pokud je mazací soustava dokonale těsná a olej trvanlivý.

Plynulý průtok oleje mazaným místem zaručuje dokonalé mazání za všech pracovních podmínek, kterým použitý olej vyhovuje.

Nejjednodušší, a tím také nejlevnější způsob mazání v dlouhodobých mazacích soustavách je mazání beztlakové. Olej se přivádí do mazaného místa přímým namáčením pohybující se části stroje do olejové lázně, nebo prostřednictvím jednoduchého ústrojí zasahujících do této lázně, kam olej proteklý mazným místem opět stéká[6].

- a) kroužkové mazání
- b) polštářové mazání
- c) kotoučové mazání
- d) brodicí mazání
- e) rozstřikové mazání

### 4.3 Oběhové mazání

Je nejdokonalejší, ale i nejnákladnější způsob mazání strojů. Zajišťuje bezpečnou dopravu oleje do všech třecích míst, dovoluje kontrolu mazání, dosažení čistoty dopravovaného oleje, jeho chlazení. Jsou-li před mazaná místa zařazeny regulační ventily, umožňuje toto mazání i seřadit množství oleje podle potřeby jednotlivých třecích míst. Vždy musí soustava obsahovat olejové čerpadlo, kromě toho musí být do oběhu zapojen i olejový čistič.

Při oběhovém mazání mohou nastat dva případy:

- a) čerpadlo saje olej z nádrže, do níž z mazaných míst stéká, a přečerpává jej do výše položené nádrže, odkud olej teče samospádem (tedy jen s malým přetlakem) na příslušná místa.
- b) čerpadlo saje olej z nádrže a tlačí jej přímo do mazaných míst, odkud se olej vrací znovu do téže nádrže

Z hlediska odvodu tepla z prostoru ložiska plní druh mazací soustavy zásadní roli. U velkých energetických strojů kdy otáčky strojů se pohybují od několika tisíc do několika desítek tisíc otáček za minutu a váha rotoru přesahuje několik desítek tun, se využívá oběhové mazání.

Množství tepla odvedeného z ložiska zde závisí na velikosti průtoku oleje ložiskem, a na množství olejové náplně v soustavě mazání a způsobu chlazení oleje[6].

## 5 Vibrodiagnostika strojů uložených v kluzných ložiskách

Základním účelem monitorování stavu vibrací strojů je poskytování informací o provozním stavu strojů pro jejich zabezpečení v případě náhlého vzrůstu vibrací (alarm výstrahy a vypnutí) a pro plánování údržbářských činností. Nedílnou částí tohoto procesu je hodnocení stavu vibrací stroje za celou dobu provozu (vytvoření trendu vibrací).

Monitorování stavu vibrací může poskytnout informace pro následující účely:

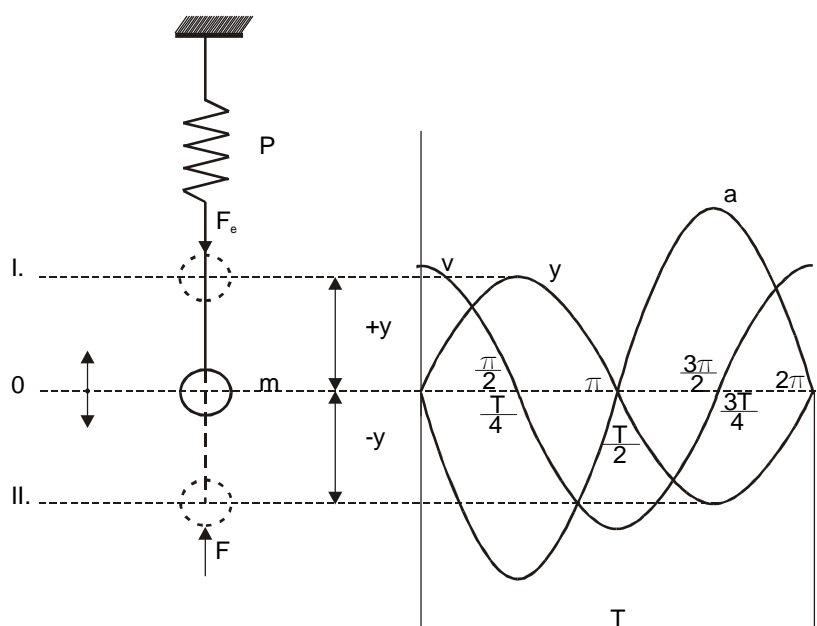
- zvýšení zabezpečení (ochrany) zařízení
- zlepšení bezpečnosti personálu
- zlepšení postupů údržby
- včasné zjištění problémů

Měření vibrací pro monitorování stavu může být prováděno mnoha způsoby, od velmi jednoduchého až po velmi složité. Avšak všechna tato měření mají společný cíl, přesně a spolehlivě ohodnotit stav strojů.

### 5.1 Základní principy vzniku chvění

Vznik chvění lze vysvětlit na hmotném bodě  $P$  pověšeném na pružině, která je pevně uchycena na jednom konci. Pohyb takového hmotného bodu je způsoben pružnou silou, tj. síla vznikající pružností jakéhosi prostředí (tělesa) při jeho deformaci.

Takhle se brání pružné těleso proti změně tvaru. Jedná se o reakci na vnější sílu působící deformaci tělesa. Tato pružná síla se snaží uvést deformované těleso do původního stavu.



Obr. 4 Kmitavý pohyb

Byla-li pružina vnější silou stlačena, snaží se jí pružná síla roztáhnout na původní délku. Hmotný bod upevněný na volném konci pružiny se nachází v klidu, v rovnovážné poloze nula, pokud na něj nepůsobí žádná vnější síla. Jestliže považujeme pružinu (těleso) za dokonale pružnou, řídí se pružná síla  $F_e$  Hookovým zákonem a je přímo úměrná výchylce  $y$  volného konce pružiny a má opačný směr než výchylka. Je pak

$$F_e = -yK \quad (5.1)$$

kde  $K$  je tuhost pružiny.

Setkáváme se se silami, které nejsou způsobeny pružností tělesa, ale mají podobný charakter, chovají se jako pružná síla, jsou to kvasielastické síly a způsobují rovněž kmitavý pohyb.

Jestliže se vychýlí hmotný bod z rovnovážné polohy nula, bude se pohybovat směrem k ní zrychleným pohybem a setrvačností přejde na opačnou stranu klidové polohy a vzdaluje se od ní. Účinkem pružné síly je pohyb zpožděný, až se zastaví. Pak opět pružná síla vrací hmotný bod k rovnovážné poloze z druhé strany, klidovou polohou opět setrvačností přijde až do místa původního vychýlení. Uvedený pohyb hmotného bodu okolo rovnovážné polohy se

opakuje a je kmitavým nebo harmonickým pohybem. Jeho průběh závisí jednak na setrvačných vlastnostech hmotného bodu a jednak na vlastnostech pružiny.

$$F_e = ma \quad (5.2)$$

Jestliže uvažujeme ztráty energie v pružině a tření tělesa  $m$ , bude kmitání tlumené a v pohybové rovnici se objeví další členy.

Během pohybu v uvažovaném příkladu nepůsobí po celou dobu pohybu žádné síly, které by zakřivovaly dráhu pohybu. Lze tedy nazvat popsany kmitavý pohyb, pohybem přímočarým.

Počet kmitů, které vykoná hmotný bod za jednotku času, udává kmitočet  $f$  (frekvence)

$$f = \frac{1}{T} \quad (5.3)$$

kde  $T$  je doba jednoho kmitu. Kmitočet  $f$  měříme v jednotkách Hz [s<sup>-1</sup>].

Často bývá udáván kmitočet místo  $f$  veličinou  $\omega$ , která je  $2\pi$  násobkem kmitočtu.

$$\omega = 2\pi f \quad (5.4)$$

je to úhlový kmitočet nebo kruhová frekvence.

Průběh jednoduchého kmitavého pohybu je určen amplitudou výchylky  $Y$  a kmitočtem  $f$ . Hmota velikosti  $m$  na pružině tvoří kmitavý systém, který kmitá vždy stejným kmitočtem, nezávisle na amplitudě výchylky. Tento kmitočet nazýváme vlastním kmitočtem soustavy nebo kmitočtem rezonančním.

Položíme rovnici

$$\frac{K}{m} = \omega^2 \quad (5.5)$$

pak je

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \omega^2 y = 0 \quad (5.6)$$

Tato diferenciální rovnice druhého řádu, lineární, homogenní s konstantními koeficienty a bez členu s první derivací má řešení

$$y = Y \sin(\omega t + \varphi) \quad (5.7)$$

kde  $Y$  a  $\varphi$  jsou integrační konstanty. Argument  $(\omega t + \varphi)$  je fází harmonického pohybu.

Rychlost kmitavého pohybu stanovíme derivováním průběhu výchylky  $y$  podle času:

$$v = \frac{dy}{dt} = \omega Y \cos(\omega t + \varphi) \quad (5.8)$$

Kmitavý pohyb popsaný rovnicí (3.9) probíhá určitou rychlostí  $v$ , kterou označujeme obvykle jako rychlost kmitání. Amplituda rychlosti kmitavého pohybu je

$$V = \omega Y = 2\pi f Y \quad (5.9)$$

Zrychlení kmitavého pohybu bude

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2} = -\omega Y \sin(\omega t + \varphi) \quad (5.10)$$

a jeho amplituda

$$A = \omega^2 Y \quad (5.11)$$

### **Analýza signálů buzených chvěním**

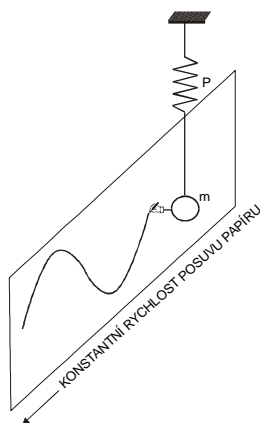
Analýzu signálů buzených chvěním můžeme provést ve třech oblastech:

- modální
- časové
- frekvenční

#### **Časová oblast**

V téhle oblasti je již signál pozorován a popsán. Na základě měření nebo pozorování je možné zjistit stavy nebo změny v pozorovaném objektu, které probíhají v časové závislosti.



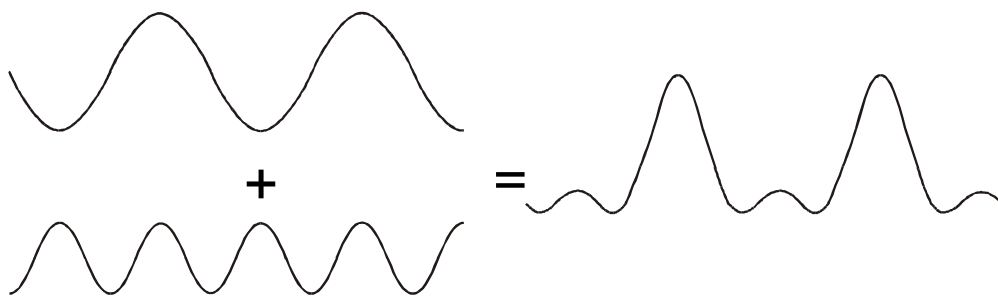


Obr. 5 Přímý zápis výchylky v časové oblasti

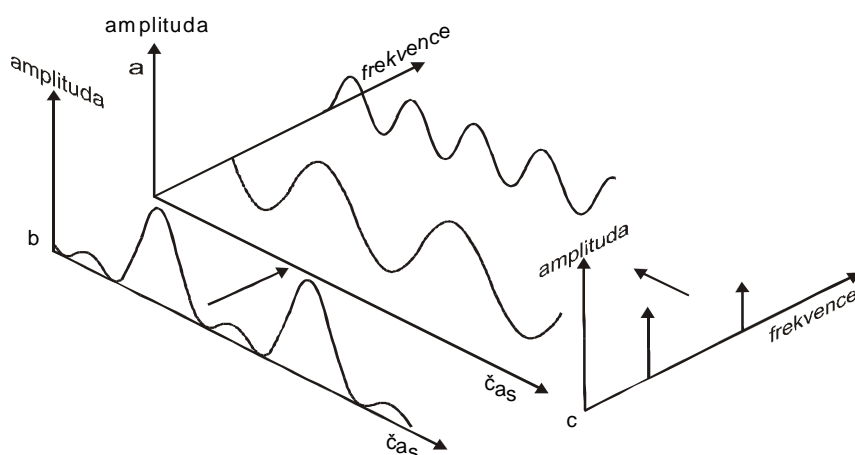
Na obrázku je zobrazena jednoduchá mechanická soustava o jednom stupni volnosti, ve které chvějící se hmota  $m$  je vybavená prostým zapisovačem. Zapisovač může zaznamenávat okamžitou polohu hmoty na papírovém pásu, který se pohybuje se známou a konstantní rychlostí. Tento zápis je zápisem výchylky ve funkci času [5].

### Frekvenční oblast

Pomocí Fourriera je známo, že každý signál je složen z několika harmonických složek s různými kmitočty. Vhodným výběrem amplitud, frekvencí a fází těchto složek je možné získat identický průběh s průběhem původním.



Obr. 6 Signál, který vznikl v důsledku součtu dvou harmonických signálů

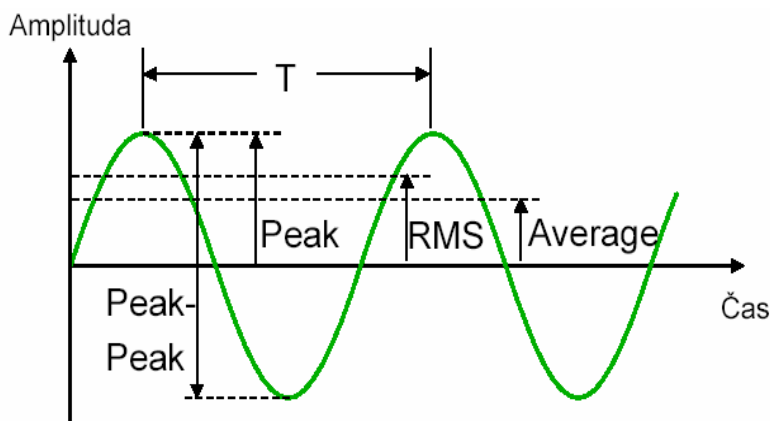


Obr. 7 Závislosti mezi časovou a frekvenční oblastí

Na obrázku a) je zobrazen trojrozměrný souřadnicový systém, který zobrazuje součet harmonických signálů. Dvě souřadnicové osy zobrazují čas a amplitudu signálu, který je znám z předchozího popisu signálu v oblasti času. Třetí souřadnice je frekvence, která umožňuje analýzu harmonických složek. Pokud se na obrázek podíváme ve směru osy frekvence, obdržíme průběh zobrazený na obrázku b) tj. průběh v časové oblasti. Při pohledu na obrázek a) ve směru časové souřadnice obdržíme průběh zobrazen na obrázku c) tj. průběh ve frekvenční oblasti, který se nazývá frekvenční spektrum.

Při zobrazení signálů v časové nebo frekvenční oblasti nejsou ztraceny nebo změněny informace o signálech ale pouze tyto transformace umožňují náhled na signál z jiné strany [5].

Kmitavý pohyb je možné vyhodnotit pomocí čtyř ukazatelů, charakterizujících periodický průběh kmitavého pohybu. Tyto veličiny jsou vyobrazeny na níže uvedeném obrázku.



Obr. 8 Znázornění měřených veličin kmitání na sinusové křivce

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (x^2(t)) dt}, \quad (5.12)$$

$$Average = \frac{1}{T} \int_0^T |x| dt, \quad (5.13)$$

$$CrestFactor = \frac{Peak}{RMS} \quad (5.14)$$

Peak-Peak - maximální rozkmit (špička, špička) označujeme ji také jako dvojitou amplitudu, nebo hodnotu špičky- špičky, udává největší rozkmit hodnocené vlny a její použití je vhodné zejména tam, kde je z hlediska maximálně přípustného mechanického namáhání a konstrukčních vůlí důležitá výchylka chvění.

Peak – vrcholová hodnota (špička) popisuje amplitudu krátkodobých jevů, mechanických rázů podobně, avšak pouze indikuje přítomnost špičky, neodráží časový průběh ani kmitočtové složení hodnoceného chvění.

Average – střední hodnota (průměr) odráží časový průběh hodnoceného chvění, avšak nemá přímý vztah k žádné důležitější fyzikální veličině.

RMS – efektivní hodnota (root mean square) je nejdůležitější hodnota, která odráží časový průběh chvění a současně přímý vztah k jeho energetickému obsahu a je tedy i měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti mechanického chvění [3]

## 6 Hodnocení stavu stroje na základě analýzy spekter vibrací

- opotřebení valivých a kluzných ložisek
- opotřebení ozubených kol
- nevyváženost rotujících hmot
- nesouosost hnacího a hnaného agregátu
- mechanické vůle
- uvolnění v základu nebo prasklý nosný rám
- nesymetrii magnetického pole na elektromotorech, synchronních kompenzátorech
- poškozený elektromagnetický obvod
- prasklé rotorové tyče asynchronních elektromotorů
- nesymetrickou vzduchovou mezeru mezi statorem a rotorem elektromotorů
- vibrace, které nepříznivě působí na lidský organismus

### 6.1 Diagnostický systém měření vibrací na kluzných ložiscích

Kluzná ložiska měřených turbogenerátorů jsou opatřena stabilně snímači vibrací zrychlení pro sledování celkových hodnot rychlosti vibrací.

Protože z důvodů vysokých nákladů a nutnosti konstrukčních zásahů do ložisek není možné využít snímání orbitální dráhy hřídele se snímači na vířivé proudy, byly pro měření použity snímače zrychlení vibrací a přenosný analyzátor a datakolektor. Je však nutno poznamenat, že hodnoty naměřené na ložiskovém domku neodpovídají plně skutečnému pohybu hřídele rotoru, neboť jistá část vibrační energie je mařena právě ve vrstvě oleje v ložisku a mění se v teplo.

K měření vibrací na kluzných ložiscích byl použit analyzátor a datakolektor vibrací Adash A 4300 – VA3. K převodu signálu byl použit snímač zrychlení vibrací typ Adash A 102 – 1A. Analýza naměřených dat byla provedena v softwaru DDS 2007.

### 6.1.1 Měřicí přístroj ADASH A 4300 – VA 3

S pomocí analyzátoru a datakolektoru vibrací ADASH 4300 – VA3 je možné provést sběr dat a analýzu dat, a to hned na místě na displeji analyzátoru nebo později v počítači.

Analyzátor umožňuje zaznamenávat statická data (celkové hodnoty vibrací, v rozsahu efektivní hodnota, špičková hodnota, rozkmit), dále pak dynamická data v podobě časového záznamu, spekter vibrací, přechodové jevy.

Naměřená data zaznamenává v jednotkách rychlosti ( $\text{mm.s}^{-1}$ ), zrychlení ( $\text{m.s}^{-2}$ , g), popř. posunutí ( $\mu\text{m}$ ).



Obr. 9 Analyzátor ADASH 4300-VA3

#### Parametry měřící aparatury:

##### Aplikace:

- Diagnostika ložisek
- Diagnostika mechanických poruch strojů - nevyváženost, nesouosost, mechanické uvolnění, rezonance.
- Diagnostika ventilátorů, čerpadel, převodovek, motorů, turbín, obráběcích strojů.
- Diagnostika pomaloběžných strojů - papírenské stroje, válcovací tratě, transportní mechanismy.
- Diagnostika mazání ložisek
- Provozní vyvažování strojů

- Měření provozních tvarů kmitů stroje
- Měření otáček
- Výstupní kontrola výrobků
- Certifikace CE 1026 Ex II 2G Ex ib IIC T3 (ochrana proti jiskření)

**Vlastnosti:**

- Upgrade firmware přes RS232 !!!
- Datakolektor - pochůzkový režim měření
- Analyzátor - nastavení přístroje během on-line měření
- Rychlé přepínání režimů datakolektor - analyzátor
- Klávesnice s možností ovládání jednou rukou
- Grafický podsvětlený displej 320 x 240 bodů
- Umožňuje připojit snímače zrychlení, rychlosti a posunutí, optickou sondu, DC/AC vstup, klešťový měřicí transformátor proudu, TTL nebo analogová spoušť
- Možnost připojení akcelerometrů stabilně nainstalovaných na stroji
- ICP napájení snímače
- Analýza stavu ložisek - Bearing, L-Bearing
- Analýza stavu pomaloběžných ložisek - Peak Watch
- FFT analýza, řadová analýza
- Průměrování signálu
- Analýza časového signálu
- Frekvenční rozsah AC/ICP 0,8-20 000 Hz
- Detekce RMS, 0-Peak, Peak-Peak
- Crest a Kurtosis faktor
- Možnost zadávání dat přímo z klávesnice
- Stejnosměrná měření napětí, teploty, tlaku.
- Paměť až 12 MB
- Rozhraní RS232 pro komunikaci s počítačem
- Indikace přebuzení a poruchy snímače nebo kabelu
- Napájení 4 x AA akumulátory nebo alkalické články
- Software DDS 2000, A4300 Download, PTK 5.00

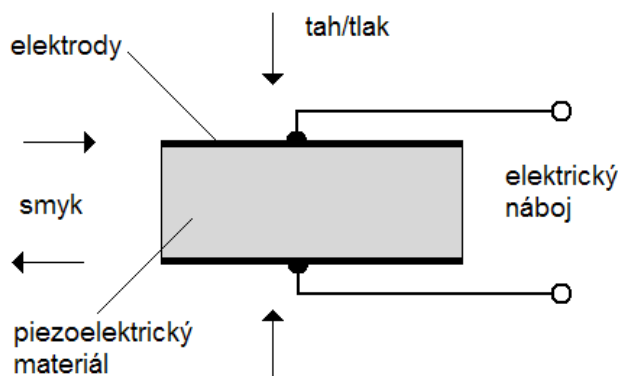
### 6.1.2 Volba snímače vibrací

V současné době se používají převážně piezoelektrické akcelerometry. Mají široký pracovní kmitočtový a dynamický rozsah, pevnou a robustní konstrukci, vysokou spolehlivost, dlouhodobou stabilitu a nepotřebují vnější napájecí zdroj.

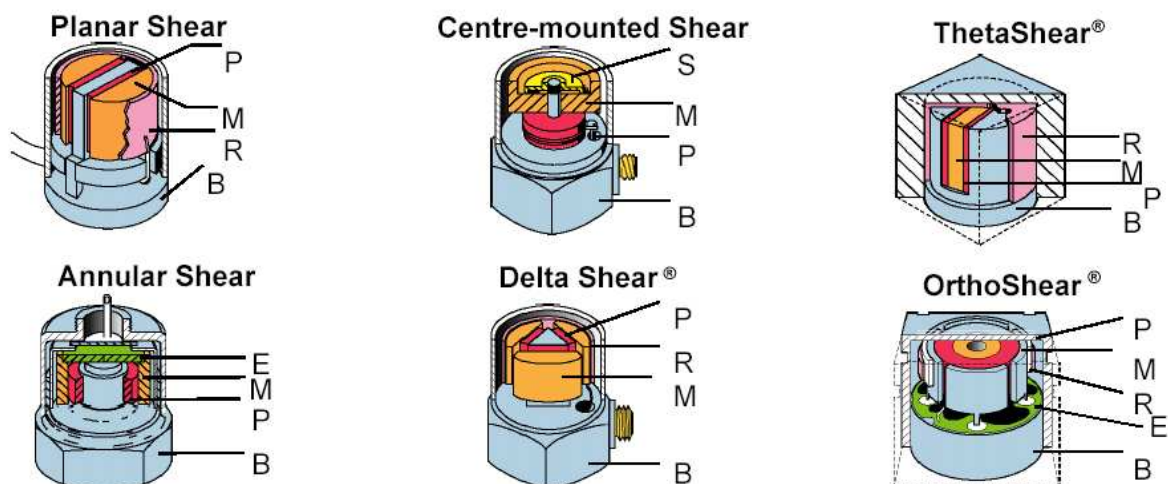
Piezoelektrický snímač se skládá z jednoho nebo více piezoelektrických krystalů, což je většinou uměle polarizovaná keramika a hmota, která tento krystal zatěžuje a pomocí pružin vytváří předpětí v krystalu. Působením síly na krystal se v krystalu vytváří elektrický náboj. Tento signál se dále zpracovává v externí nebo interní elektronice.

Akcelerometry s interní elektronikou lze použít pouze do teploty 125°C. Pro vysoké teploty se musí použít zesilovač nábojový zapojený na dálku. Tyto snímače lze použít až do teploty 750°C.

Podstatou jevu je vznik elektrického náboje na čelních stěnách výřezu z piezokeramiky při jeho mechanickém namáhání tahem, tlakem nebo smykem. Vznikající elektrický náboj je úměrný působící mechanické síle [3].

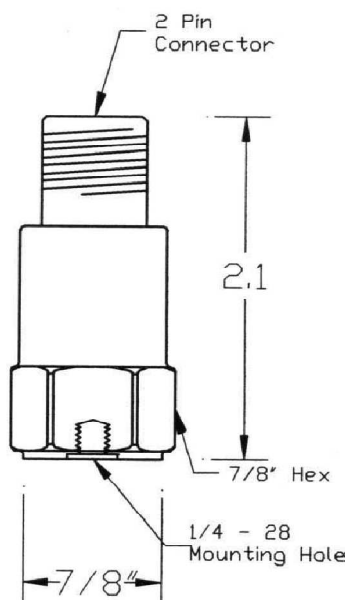


Obr. 10 Principiální schéma piezoelektrického akcelerometru



Obr. 11 Piezoelektrické snímače zrychlení s různými typy provedení piezoelektrických krystalů (B - Základna, E - Zabudovaná elektroda, M - Setrvačná hmota, P - Piezoelektrický člen, R - Připevňovací kroužek, S - Pružina)

K měření vibrací byl použit snímač zrychlení vibrací Adash, s těmito vlastnostmi:



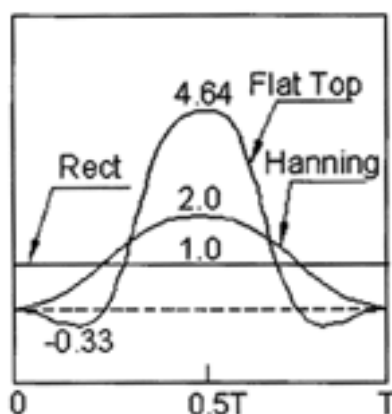
Obr. 12 Snímač Adash AC 102 - 1A



## 6.2 Volba časového okna

Podle předpokládaného průběhu signálu volíme také časová okna. Nejpoužívanějšími okny jsou okna typu Hanning, Flat Top, Rectangular. Okna typu Hanning a Flat Top mají spojitý průběh, nejsou vhodné pro vážení signálů ve formě rázových impulsů, kde může dojít k oříznutí signálu.

Tam bychom použili obdélníkové okno Rectangular. Volbu okna provádíme rovněž s ohledem na počet čar (vzorkovací frekvenci). Okna Hanning a Flat Top dávají největší váhu uprostřed, kdežto váha u okna Rectangular je v celém průběhu stejná.



Obr. 13 Časová okna

## 6.3 Volba měřících míst a uchycení snímačů

Měření jsou provedena na exponovaných částech stroje, které jsou běžně dostupné. Aby bylo dosaženo maximálního přenosu vibrační energie na snímač a tím minimalizace útlumu signálu. Snímač je umístěn vždy ve směrech maximálního šíření energie signálu. Proto i oblasti měřících míst jsou zbaveny povrchového nátěru. V případě nerovného povrchu jsou na objekt uchyceny ocelové podložky s rovnou plochou.

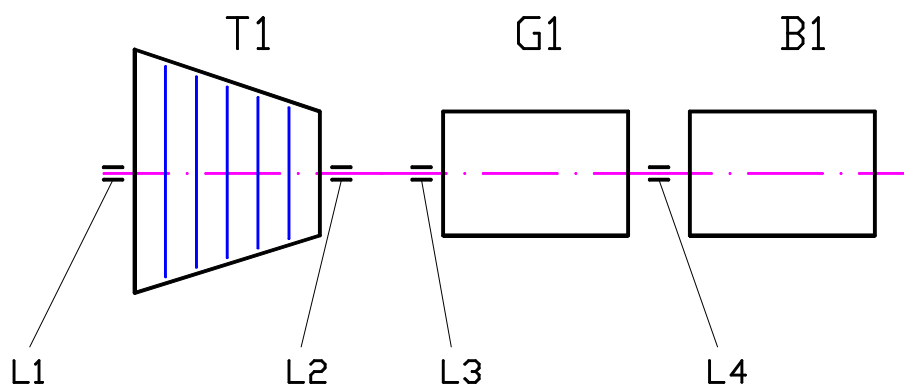
Při měření se musí také zaznamenat specifická měřící místa a směry. Pokud je známo, že se tak zajistí dostatečné informace o velikosti vibrací stroje, může se namísto typičtější dvojice kolmo umístěných snímačů použít na víku ložiska nebo ložiskovém stojanu jednotlivý snímač. Při hodnocení vibrací z jednoho snímače umístěného v měřící rovině je však třeba postupovat velice opatrně, neboť snímač nemusí být orientován tak, aby poskytl náležitou aproximaci maximální hodnoty v této rovině [2].

Pokud je to možné, měříme vibrace ve třech rovinách:

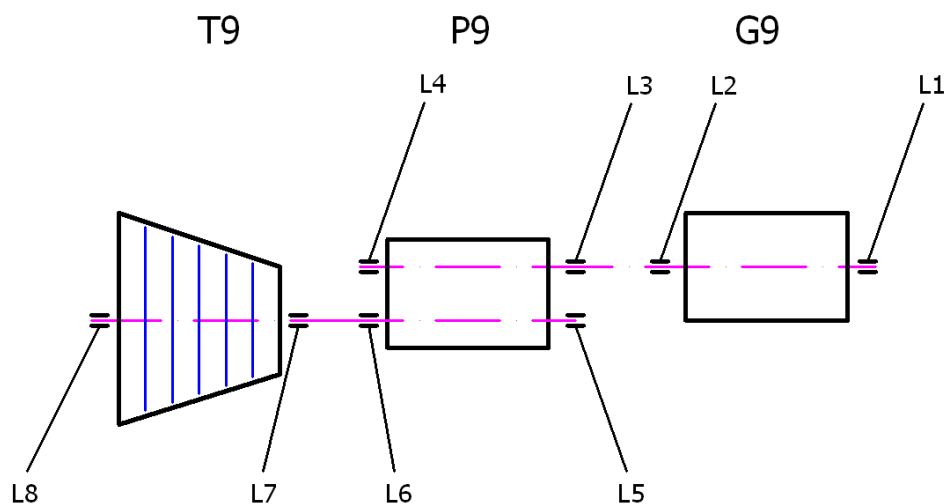
- a) Horizontální
- b) Axiální
- c) Vertikální



Obr. 14 Provedení měřicích míst



Obr. 15 Měřicí místa TG1, TG3 a TG6 bez převodovky



Obr. 16 Měřicí místa TG5 a TG 9 s převodovkou

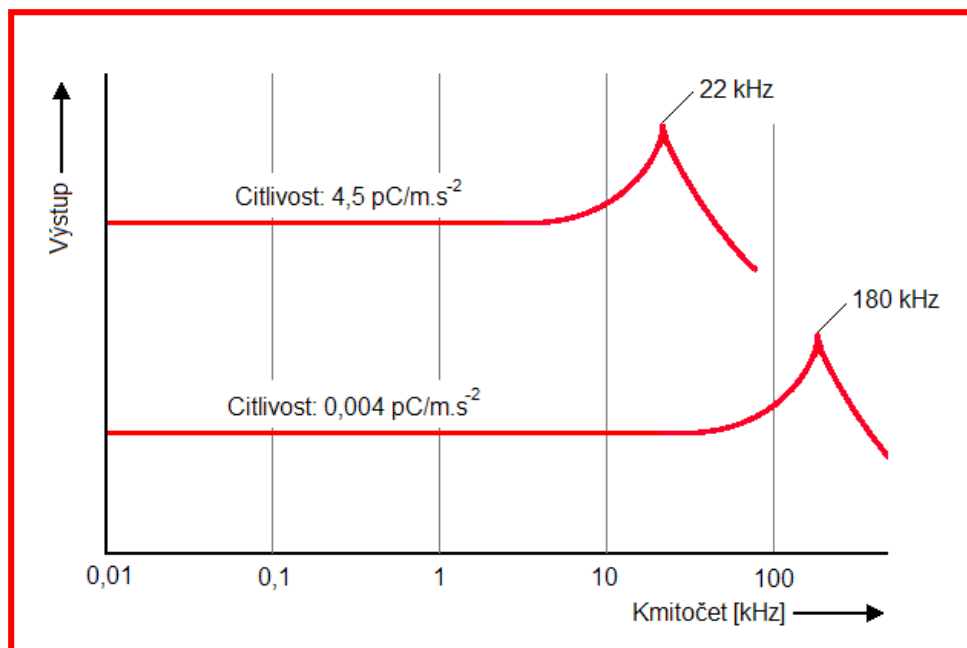
### 6.3.1 Vliv prostředí na snímaný signál

- Teplota - klasické snímače zrychlení můžou pracovat v teplotách do 250°C, při vyšších teplotách nastává proces depolarizace piezoelektrického materiálu. Při vyšších teplotách je vhodné používat chlazení, jiné měření nebo používat snímače se speciální odolnou piezokeramikou.
- Kabely - vysoká výstupní impedance piezoelektrických akcelerometrů je příčinou problémů spojených s indukovanými šumy přívodních kabelů. Příčinou těchto problémů můžou být uzavřené zemnicí smyčky triboelektrické a magnetické šumy.
- Další vlivy - hluk, magnetické pole, vlhkost, příčná citlivost snímače, radioaktivní záření, korozivní látky [3]

### 6.3.2 Citlivost a frekvenční rozsah

Citlivost chápeme jako poměr elektrického signálu snímače ke zrychlení, které by zmíněný signál vyvolalo. Je jedním z nejpodstatnějších parametrů každého snímače. Z hlediska citlivosti je ideální snímač generující co největší elektrický signál již při malém

zrychlení. Avšak pro splnění těchto požadavků vysoké citlivosti je nutné použít velký piezoelektrický člen s většími rozměry a hmotností.



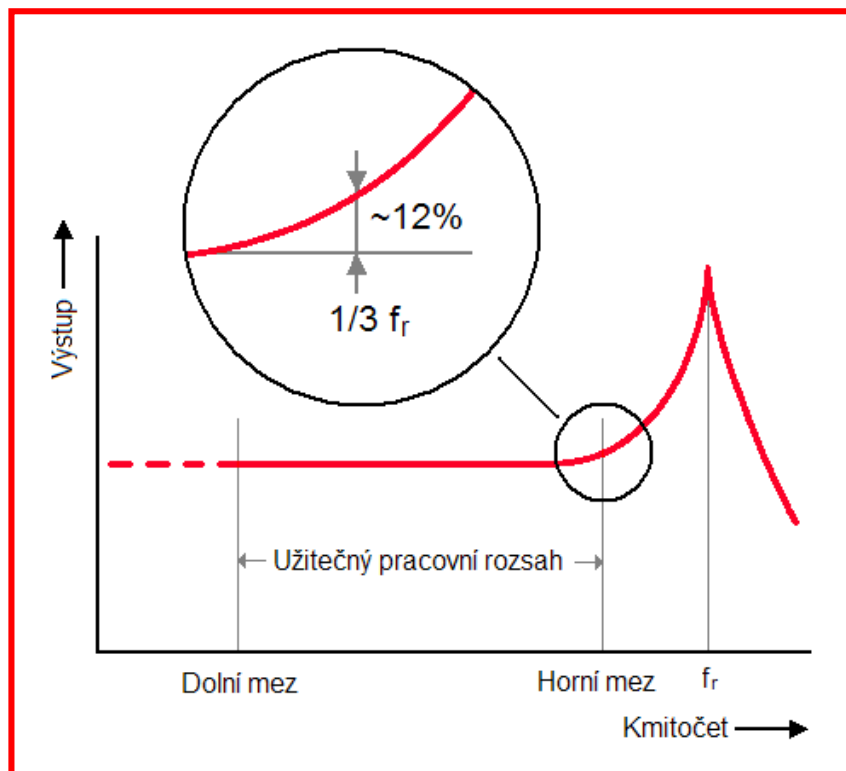
Obr. 17 Závislost citlivosti na kmitočtu pro různé hmotnosti snímačů

Používáním moderních předzesilovačů je možné zpracovat i velmi slabé elektrické signály, hmotnost snímače zrychlení by však neměla být větší než  $1/10$  dynamické hodnoty objektu na němž je snímač připevněn.

Frekvenční rozsah snímače zrychlení je v oblasti nízkých frekvencí omezen dvěma faktory. Jsou to dolní mezní frekvence předzesilovače k němuž je snímač připevněn (u většiny kvalitních předzesilovačů daleko pod  $1 \text{ Hz}$ ) a vliv změn teploty okolí, k nimž jsou piezoelektrické snímače citlivé (u současných piezoelektrických snímačů namáhaných stříhem je možné kmitočty pod  $1 \text{ Hz}$ ).

Horní mezní pracovní frekvence snímače zrychlení je určena vlastní rezonanční frekvencí snímače. Dle empiricky zjištěného pravidla odpovídá mezní pracovní kmitočet  $1/3$  vlastní rezonanční frekvenci.

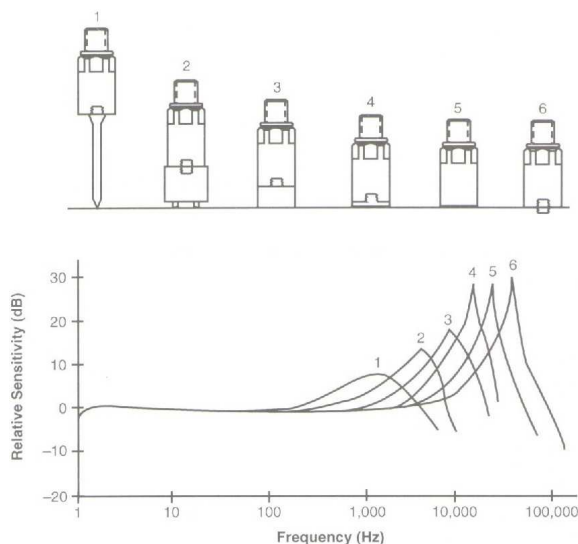
Snímač je citlivý na směr působících mechanických kmitů. Hlavní osa citlivosti snímače bývá obvykle osou symetrie. Citlivost ve směru kolmém na hlavní osu bývá menší než  $1\%$  hlavní osy [3].



Obr. 18 Kmitočtový rozsah snímačů zrychlení

#### 6.4 Vliv uchycení snímače na citlivost snímaného signálu

Způsob uchycení snímače je rozhodující pro zajištění snímaného signálu v dostatečné kvalitě. Důležitým faktorem je tuhost uchycení snímačů. Na níže uvedeném obrázku jsou zobrazeny frekvenční charakteristiky stejného snímače uchyceného různými způsoby na kmitající ploše.



Obr. 19 Uchycení snímačů

Dotyková jehla (viz. 1) – je nejméně citlivá na přenos signálu, montáž je snadná, ale není zajištěn stálý tlak a sklon, což nám nedává přesný pohled na změnu vibračního chování stroje. Vyžaduje jen malou úpravu plochy. Je doporučena pro orientační měření.

Magnet (viz. 2,3) – citlivost je asi dvojnásobná, než u dotykové jehly. Montáž vyžaduje očištění dotykové plochy stroje, jinak snadná.

Lepená podložka (viz. 4) – je to nejčastěji používaná metoda uchycení snímačů. Využívá se lepidel, které jen minimálně snižují citlivost na vedení vysokofrekvenčních kmitů. Lepené spojení je citlivější než u magnetů zhruba o dvojnásobek

Lepený spoj (viz. 5) – v praxi se jedná o méně používanou metodu.. Lepený spoj pokládáme na vybroušený a chemicky vyčištěný povrch. Pro spojení snímače s vyšetřovaným objektem se používají zejména epoxidová lepidla, včelí vosk apod.

Šroubová spojení (viz. 6) – používá se většinou spoj se závitovým červíkem. Jeho montáž vyžaduje rovněž očištění stykových ploch a vytvoření závitového otvoru v měřeném místě.

Používá se hlavně při diagnostických systémech ON-LINE [1].

## 7 Měření teplot a teplotních polí pomocí termokamery

Jedním ze sledovaných parametrů v diagnostice a údržbě je teplota, která je jevem charakterizujícím určitý fyzikální stav měřeného objektu. Díky jejímu sledování lze regulovat výrobní procesy, kontrolovat provozní stavy strojů a zařízení, diagnostikovat přehřívání elektrických spojů, kabelů nebo mechanických součástí (např. převodovky) či stavebně tepelné vlastnosti budov.

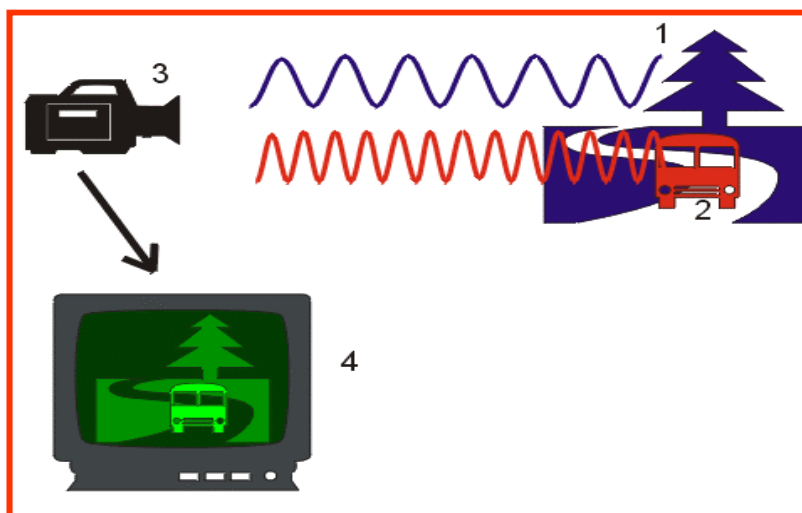
Termovizní měření je bezkontaktní měření teploty. Využívá infračerveného záření pro bezpečné měření povrchových teplot předmětů. Průběh teploty a rozložení se zaznamenává prostřednictvím termovizní kamery. Pomocí termokamery můžeme toto zařízení zachycovat a uložit ve formě teplotních pixelů, takzvaného termogramu. Je možné měřit i vzdálenější a nepřístupné povrchy a to bez vyřazení diagnostikovaného zařízení z provozu.

Termovizní měření se provádí pomocí infračerveného kamerového systému, který měří a zobrazuje infračervené záření vyzařované objektem. Na základě skutečnosti je možné tuto teplotu zobrazit a vyhodnotit.

Pro dokumentaci měřeného objektu se obraz – termogram zaznamenává na vyjímatelnou paměťovou kartu. Termogramy jsou vyhodnocovány v PC pomocí softwaru [15].

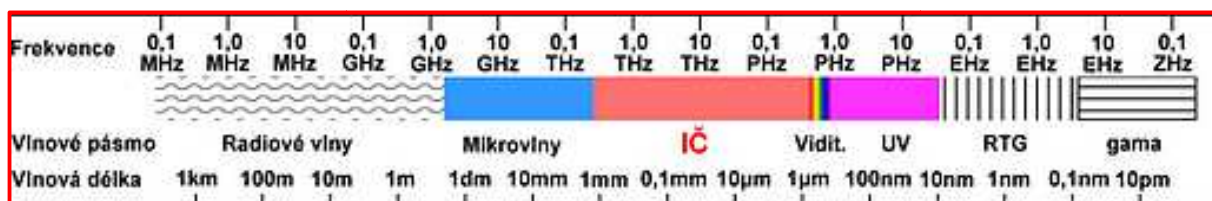
### 7.1 Princip Termovize

Termovize využívá měření částí elektromagnetického spektra, které je rozděleno na několik vlnových pásem.



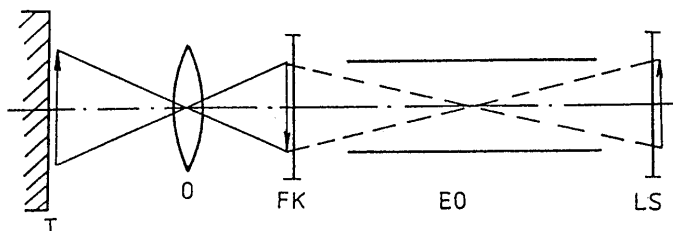
Obr. 20 Princip snímání vlastního tepelného záření těles v IR oblasti [5]

Jedná se o radiové vlny, mikrovlny, infračervené záření, viditelná část spektra, UV záření, rentgenové záření a gama záření. Termovize využívá měření infračervené části (IČ) spektra. IČ spektrum je dále rozděleno na čtyři menší pásma. Jsou to pásma blízké IČ (0.75-3  $\mu\text{m}$ ), střední IČ (3-6  $\mu\text{m}$ ), vzdálené IČ (6-15  $\mu\text{m}$ ) a velmi vzdálené (15-100  $\mu\text{m}$ ). Různé měřicí systémy měří v různých spektrech a rozlišují se tak např. dlouhovlnné systémy, krátkovlnné systémy apod.



Obr. 21 Elektromagnetické spektrum

Termokamera neměří přímo povrchovou teplotu, ale povrchová teplota se dopočítává na základě změřeného infračerveného záření a zadaných okrajových podmínek. Mezi nejdůležitější okrajové podmínky patří emisivita povrchu. Emisivita povrchu je bezrozměrné číslo pohybující se v intervalu 0 až 1 a vyjadřuje poměr energie vyzařované objektem při jeho dané teplotě k energii vyzařované absolutně černým tělesem při stejné teplotě. Absolutně černé těleso má emisivitu 1. [15]



Obr. 22 Schematické znázornění principu termovizních snímků

(T – teplotní pole, O – objektiv, FK – fotokatoda, EO – elektronová optika, LS – luminiscenční stínítko)

Tepelný obraz se vytvoří pomocí objektivu na fotokatodě, která způsobí emisi elektronů, které jsou dále urychlovány elektronovou optikou a usměrněny na rovinu luminiscenčního stínítka. Tím vzniká termovizní obraz.



## 7.2 Zásady správného termovizního snímkování

Je důležité dodržovat zásady správného termovizního snímkování, tím dosáhneme co nejreálnější termogram popisující chování daného teplotního pole s možností bezkontaktně odečíst povrchové teploty.

- termografické měření je třeba předem připravit., zajistit přístupnost měřených povrchů a stabilizaci teplot
- měření se provádí za dostatečného rozdílu teplot
- měření se neprovádí, pokud je snímaná plocha nadměrně ochlazovaná větrem
- během měření nesmí mezi termokamerou a snímaným objektem pršet nebo být mlha
- plochy se musí snímat co nejkolměji

## 7.3 Technické údaje Ti45 IR FlexCam®

Pro měření teplot a snímání teplotních polí na kluzných ložiskách byla použita termovizní kamera Fluke Ti 45 IR FlexCam. Tato kamera disponuje níže uvedenými parametry.

### Pořízení obrázku:

- Detektor: 7,5/30Hz 160x120 FPA Vanadium Oxid nechlazený mikrobolometr
- Spektrální pásmo: 8 – 14 $\mu$ m
- Tepelná citlivost:  $\leq 0,080^{\circ}\text{C}/0,090^{\circ}\text{C}$  (TI45/40) při 30 $^{\circ}\text{C}$
- Elektronický zoom: 2x
- Zaměření: manuální jedním prstem

### Displej a ukládání obrázků:

- Digitální displej: 5 palců s vysokým rozlišením, barevný LCD čitelný za slunečního světla
- On-screen indikátory: indikace stavu baterie, cílové emisivity, teploty pozadí a času
- Barevné palety: 8 barevných palet
- Paměťové medium: min. 512 Compact Flash (cca 1.000 termo snímků)
- Podporované obrazové formáty: 14 bitová hloubka měřených dat, export JPEG, BMP a TIFF.
- Textové anotace obrázků: definované uživatelem, automaticky obsažené ve zprávě

**Měření teplot:**

- Teplotní rozsah:  $-20^{\circ}\text{C}$  –  $100^{\circ}\text{C}$ ,  $-20^{\circ}\text{C}$  –  $350^{\circ}\text{C}$ ,  $250^{\circ}\text{C}$  –  $600^{\circ}\text{C}$
- Přesnost:  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  nebo  $\pm 2\%$  z měřené hodnoty
- Měřicí módy: pohyblivý bod, centrální bod, centrální box, oblast min/max, průměr, izotermie, TI 45 navíc i automatická detekce teplého a studeného bodu, barevný alarm nad a pod
- Korekce emisivity: závisí na zadání uživatelem v oblasti 0,01 – 1,0
- Možnost sekvenčního snímání – počet snímků / interval

**Standardní optika:**

- 20 mm f/0,8 Germanium: úhel záběru  $23^{\circ}$  horizontálně a  $17^{\circ}$  vertikálně
- Úhlová rozlišitelnost: 2,60 mrad IFOV, 0,15m minimální fokus

**Napájení:**

- typ baterie: Li-Ion baterie, nabíjecí, vyměnitelná
- Doba napájení baterií: 2-3 hodiny nepřetržitého měření
- Nabíjení baterie: 2 stupňové inteligentní nabíjení síťovým adaptérem
- Síťové napájení: síťový adaptér 110/220 VAC, 50/60 Hz
- Úspora napájecích zdrojů: automatické vypnutí a úsporný mód



Obr. 23 Termokamera

Termografické snímky jsou vyhodnoceny pomocí softwaru SmartView 2.0. Tento program umožňuje:

- načtení termovizních snímků
- nastavení až osmi palet barev
- nastavení barevného alarmu v podobě izotermu a barevného alarmu (alarm překročení mezní hodnoty, nedosažení mezní hodnoty vnitřního rozsahu a vnějšího rozsahu)
- vkládání a editaci teplotních kurzorů
- nastavení emisivity
- nastavení okolní teploty
- možnost zobrazení snímku v IRFusion
- možnosti grafického zobrazení četnosti teplot, 2D grafu, 3D grafu
- editaci a vytvoření protokolu ve formátu docx. , popř. pdf
- export upravených snímků do grafických formátů – bmp., gif., jpg., png., tiff.,

## 7.4 Emisivita

Emisivita je mírou schopnosti daného tělesa vyzařovat tepelnou energii a určuje se jako podíl intenzity vyzařování reálného tělesa  $M_e$  ku intenzitě vyzařování dokonale černého tělesa  $M_{e0}$  se stejnou teplotou [13].

$$\varepsilon = \frac{M_e}{M_{e0}} \quad (7.1)$$

Maximální množství energie vyzařuje dokonale černé těleso ( $\varepsilon=1$ ), minimální má zrcadlo ( $\varepsilon=0$ ). Emisivita závisí na materiálu, úpravě povrchu, vlnové délce a teplotě.

Emisivitu najdeme v tabulce (viz. níže uvedená tabulka, celá přiložená v přílohách), nebo pokud nemůžeme najít, tak se používají dvě metody.

- Kalorimetrická metoda je založena na výpočtu celkové hemisférické emisivity z tepelných ztrát nebo zisků
- Radiometrická metoda používá k měření bezdotykový infračervený teploměr

Tab. 4 Tabulka emisivity

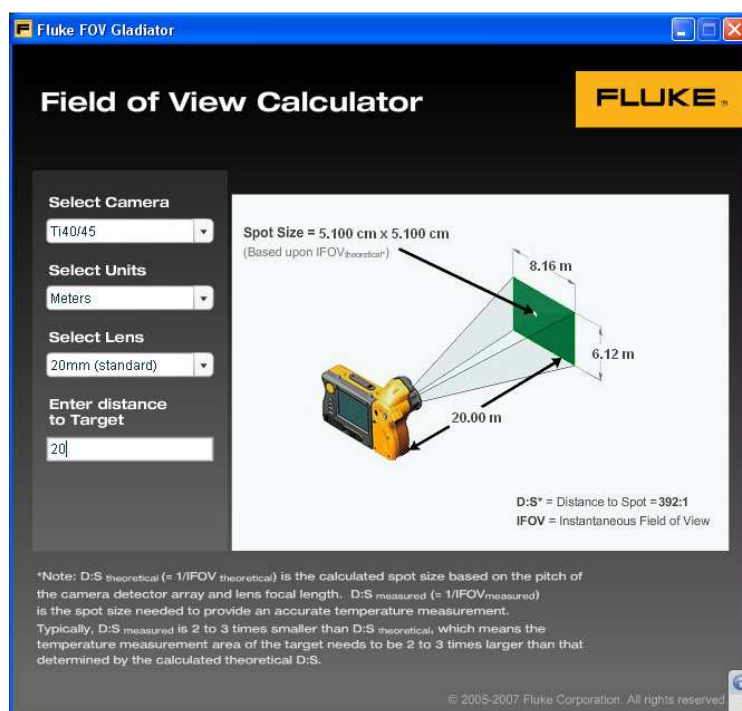
<b>Kovy</b>		
<b>Materiál</b>	<b>Teplota °C</b>	<b>Emisivita</b>
<b>Ocel</b>		
Válcovaná za studena	93	0,75-0,85
Plech	938-1099	0,55-0,61
Plech leštěný	38	0,07
Plech leštěný	260	0,1
Plech leštěný	538	0,14
Měkká ocel, leštěná	24	0,1
Měkká ocel, hladká	24	0,12
Měkká ocel, tekutá	1599-1793	0,28
Ocel, nezoxidovaná	100	0,08
Ocel, zoxidovaná	25	0,8
<b>Ocelo-slitiny</b>		
Typ 301, leštěná	24	0,27
Typ 301, leštěná	232	0,57
Typ 301, leštěná	949	0,55
Typ 303, zoxidovaná	316-1093	0,74-0,87
Typ 310, válcovaná	816-1149	0,56-0,81
Typ 316, leštěná	24	0,28
Typ 316, leštěná	232	0,57
Typ 316, leštěná	949	0,66
Typ 321	93-427	0,27-0,32
Typ 321, leštěná	149-815	0,18-0,49
Typ 321, s oxidem	93-427	0,66-0,76
Typ 347, zoxidovaná	316-1093	0,87-0,91
Typ 350	93-427	0,18-0,27
Typ 350, leštěná	149-982	0,11-0,35
Typ 446, leštěná	149-815	0,15-0,37
Typ 17-7 PH	93-316	0,44-0,51
Typ 17-7 PH, leštěná	149-815	0,09-0,16
Typ C1020, zoxidovaná	316-1093	0,87-0,91
Typ PH-15-7 MO	149-649	0,07-0,19
Stellit, leštěný	20	0,18

## 7.5 Faktory potřebné k nastavení termokamery

Kromě faktoru emisivity materiálu je snímkování ovlivněno celou řadou vnějších vlivů. Termokamera povrchovou teplotu neměří, ale vypočítává na základě nekontaktně snímané intenzity vyzařovaného IR záření a zadání hodnot popisující vnější vlivy.

Tyto hodnoty lze zadat přímo do pracovního menu termokamery, nebo do softwaru při vyhodnocování.

Kromě zmíněné emisivity povrchu snímaného tělesa  $\varepsilon$  jsou veličiny popisující stav atmosféry. Atmosféra je chápána jako prostředí mezi snímaným tělesem a termokamerou. Faktor teploty atmosféry mezi objektem snímání a termokamerou ovlivňuje velikost stejnosměrné signálové radiační složky detekovaného IR signálu. Korekcí tohoto parametru se kompenzuje radiace atmosféry.

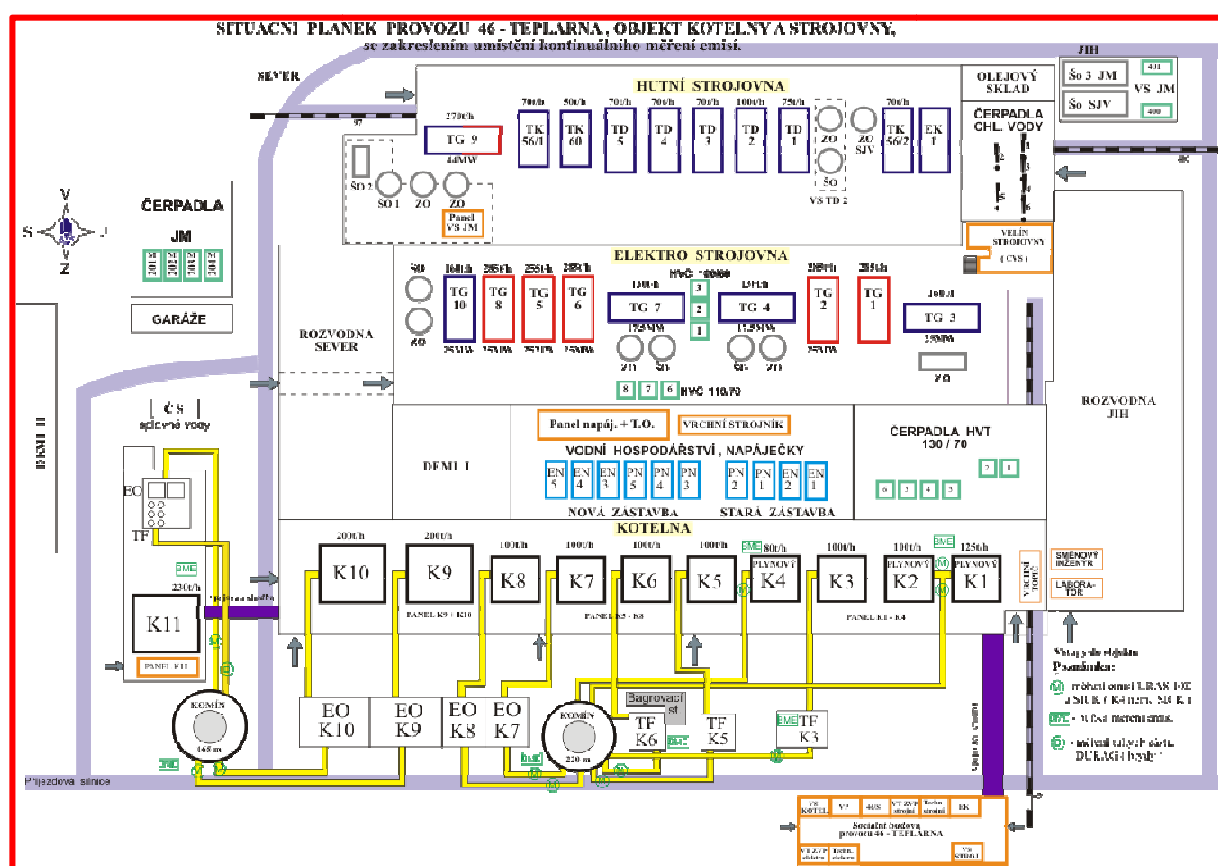


Obr. 24 Stanovení potřebné vzdálenosti pro snímání pole pomocí softwaru FLUKE

## 8 Měření a zpracování dat měření

Cílem téhle práce je stanovení závislosti vibrací na teplotě kluzných ložisek. Všechna měření proběhla na plně zatížených turbogenerátorech v závodu energetika ve společnosti ARCELORMITTAL Ostrava a.s., za doprovodu a pomocí firmy HUDECZEK SERVICE,s.r.o.

Předmětem měření byly turbogenerátory TG1 (25 MW), TG3 (25MW), TG5 (25MW) TG6 (25MW) TG9 (55MW). Štítkové údaje jednotlivých strojů jsou uvedeny v protokolech v příloze.



Obr. 25 Situační schéma ArcelorMittal



Obr. 26 Turbogenerátor



Obr. 27 Stěna obsluhy turbogenerátoru

Na těchto strojích byly sledovány provozní parametry kluzných ložisek:

- otáčky
- tlaky olejů
- teploty
- vibrace

V rámci sledování teplot kluzných ložisek jsou zaznamenávány:

- teploty v kluzném ložisku
- teploty oleje na vstupu do ložisek
- teploty oleje na výstupu z ložisek
- teplota okolí
- teplotní pole na povrchu ložisek

V rámci sledování vibrací měřených na ložiskových domcích kluzných ložisek jsou zaznamenávány:

- celkové hodnoty efektivních rychlostí vibrací v rozsahu 10 až 1000 Hz
- celkové hodnoty špičkové rychlosti vibrací v rozsahu 10 až 1000 Hz
- frekvenční spektra efektivních hodnot rychlostí vibrací v rozsahu 10 až 1000 Hz
- frekvenční spektra zrychlení vibrací v rozsahu 0 až 1000 Hz
- frekvenční spektra zrychlení vibrací v rozsahu 0 až 6400 Hz na ložiscích převodovek

Na základě analýzy teplot na kluzném ložisku je stanoven rozdíl teplot, který připadá na dynamické jevy a procesy tření v kluzném ložisku.

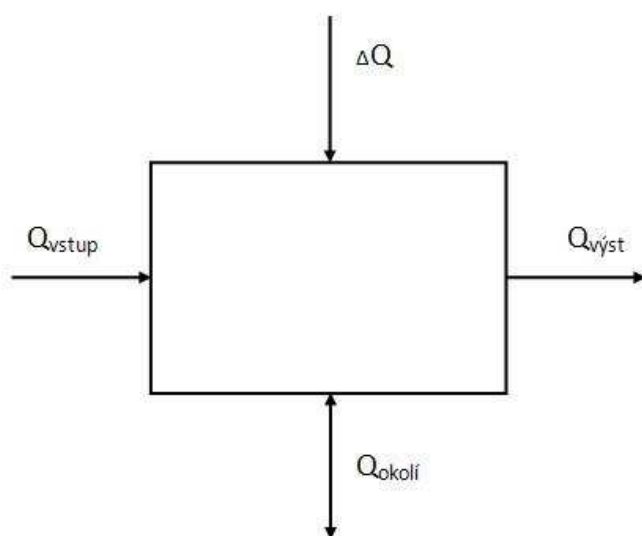
Rozdíly v teplotách jsou následně porovnávány s celkovými hodnotami efektivní a špičkové hodnoty rychlostí vibrací.

Současně je prováděná analýza stavu strojů na základě rozboru frekvenčních spekter.

## 8.1 Teplotní bilance kluzného ložiska

Teplota kluzného ložiska je závislá na mnoha faktorech. Jak je vidět na blokovém schématu, je teplota v ložisku dána teplotou oleje na vstupu do ložiska, teplotou okolí a změnou teploty vlivem vibrací, vnitřního a vnějšího tření v ložisku.





Obr. 28 Teplotní bilance

Na základě tohoto schématu je možné stanovit základní tepelnou bilanci kluzného ložiska.

$$Q_{výstup} = Q_{vstup} + \Delta Q \pm Q_{okolí} - Q_{hřídelem} \quad (8.1)$$

kde

$Q_{výstup}$  je teplo odváděné olejem z ložiska [J]

$Q_{vstup}$  je teplo přiváděné olejem do ložiska [J]

$Q_{okolí}$  je teplota okolí [J]

$\Delta Q$  je teplota vzniklá tribologickými procesy [J]

$Q_{hřídelem}$  je teplo odvedené hřídelí [J]

Z této rovnice lze vyjádřit změnu teploty  $\Delta Q$  ve tvaru

$$\Delta Q = Q_{výstup} - Q_{vstup} \pm Q_{okolí} \quad (8.2)$$

Množství tepla vyvolané tribologickými procesy je závislé na obvodové rychlosti hřídelového čepu  $v$ , tlaku oleje v ložiscích  $p$ , velikosti ložiskové vůle  $\delta$ , na druhu tření dané součinitelem tření  $\mu$ , viskozitě oleje  $\nu$ , dynamické změně vzduchové mezery způsobené vibracemi hřídelového čepu v ložisku.

## 8.2 Analýza dat vibrací

Všechna měření se ukládala do měřicího přístroje Adash pro podrobnější analýzu. Každé měření a každý měřicí bod se dá snadno později analyzovat. Jsou to data, které diagnostika potřebuje pro správné rozhodnutí o stavu stroje. V této databázi je i celá historie stroje, takže je vidno, s kterými částmi stroje byly v minulosti problémy a byly často vyměňovány.

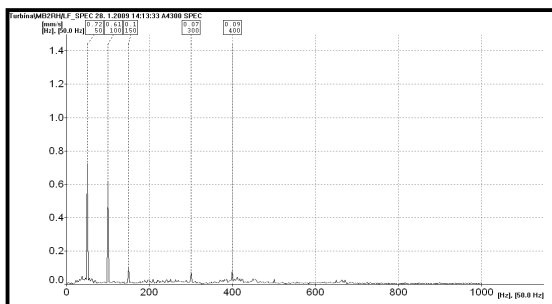
Následně byla data stažena do počítače, kde byla později vyhodnocena.

### 8.2.1 Vyhodnocování dat vibrací

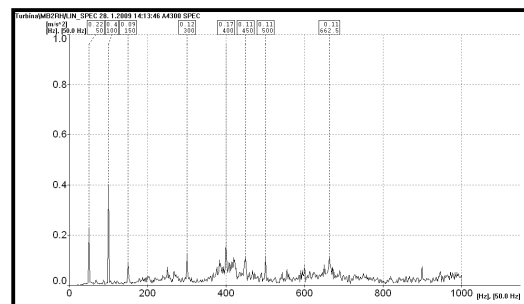


Obr. 29 Zpracování dat pomocí softwaru Adash

Po naimportování dat do počítače se vyhodnocovala frekvenční spektra rychlosti a zrychlení v měřicích bodech dle vyznačených schémat. Pro jedno ložisko tak bylo 6 frekvenčních spekter.



Obr. 30 Frekvenční spektrum efektivních hodnot rychlosti vibrací měřených v bodě MB2H



Obr. 31 Frekvenční spektrum efektivních hodnot zrychlení vibrací měřených v bodě MB2H

### 8.3 Analýza teploty

Naměřená data se ukládají na paměťovou kartu termokamery Fluke, pro pozdější zpracování dat.

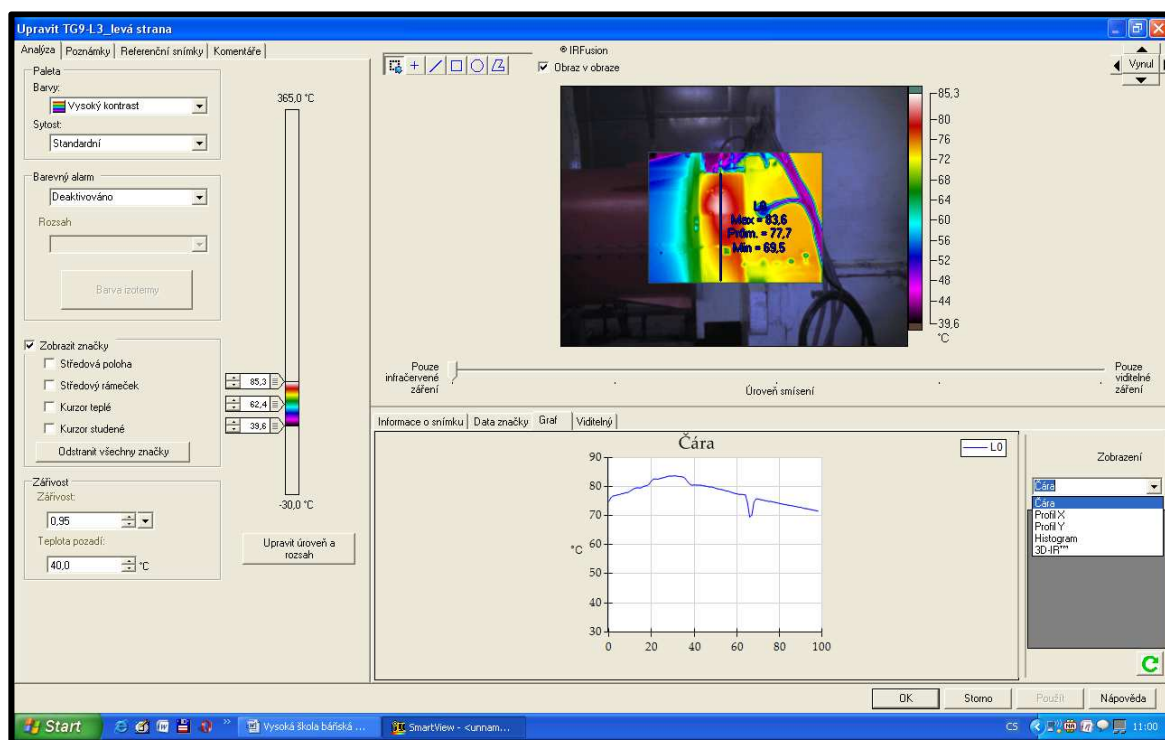
Analýza teplotních polí kluzných ložisek se provádí pomocí softwaru SmartView 2.0.

#### 8.3.1 Vyhodnocování termovizních snímků

V softwaru SmartView se musí nastavit správná teplota okolí, emisivita, rozlišení, pro přesnou identifikaci.

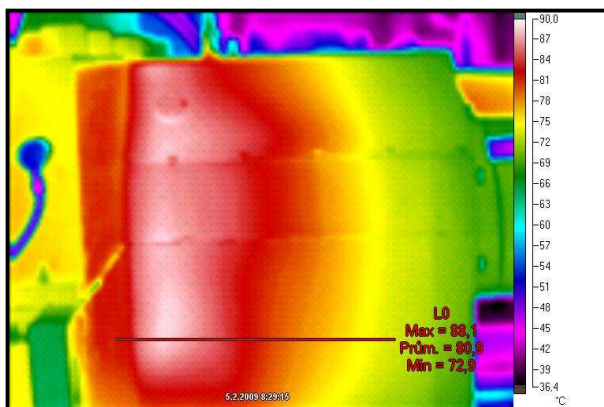
Pro analýzu termovizních snímků byly nastaveny následující parametry softwaru SmartView, nastavena paleta barev pro vysoký kontrast, styl standardní, barevný alarm deaktivován, zářivost (emisivita) 0,95 a teplota pozadí podle místa kde jsme se zrovna pohybovali, teplota byla od 38° do 55°C. Dle potřeby byl upraven i rozsah. Dále je možnost teplotních kurzorů pro snadnou orientaci teplot. Také můžeme použít funkci obraz v obraze, pro rychlou orientaci měřeného snímku. Dále máme možnost využít nabídku informace o snímku, data značky, funkci graf a jeho zobrazení v provedení 3D, histogramu a v neposlední řadě viditelný obraz celého snímku.

Po úpravě snímku, můžeme začít odečítat zvýšené teploty z ložisek.



Obr. 32 Software potřebný k vyhodnocování termosnímků

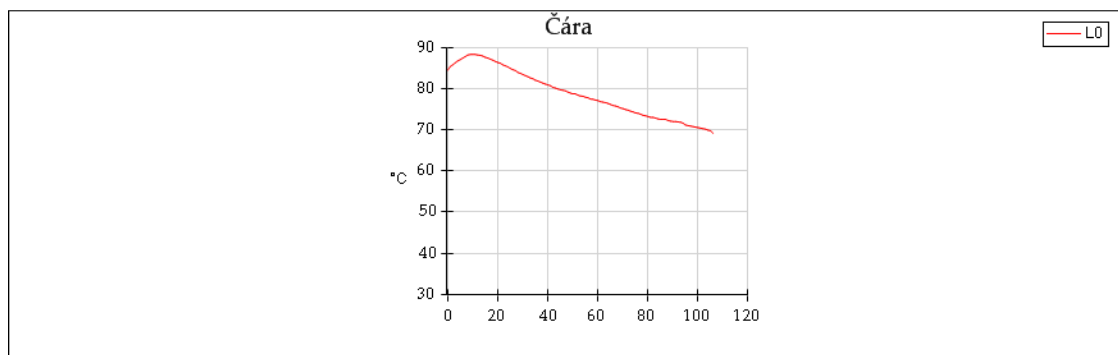
Zpracované termosnímký na turbogenerátoru TG 1, ložisek L2, L3.



Obr. 33 Termovizní snímek TG9 ložisko L5



Obr. 34 Fotografie TG9, L5



Obr. 35 Graf teploty TG 9 L5

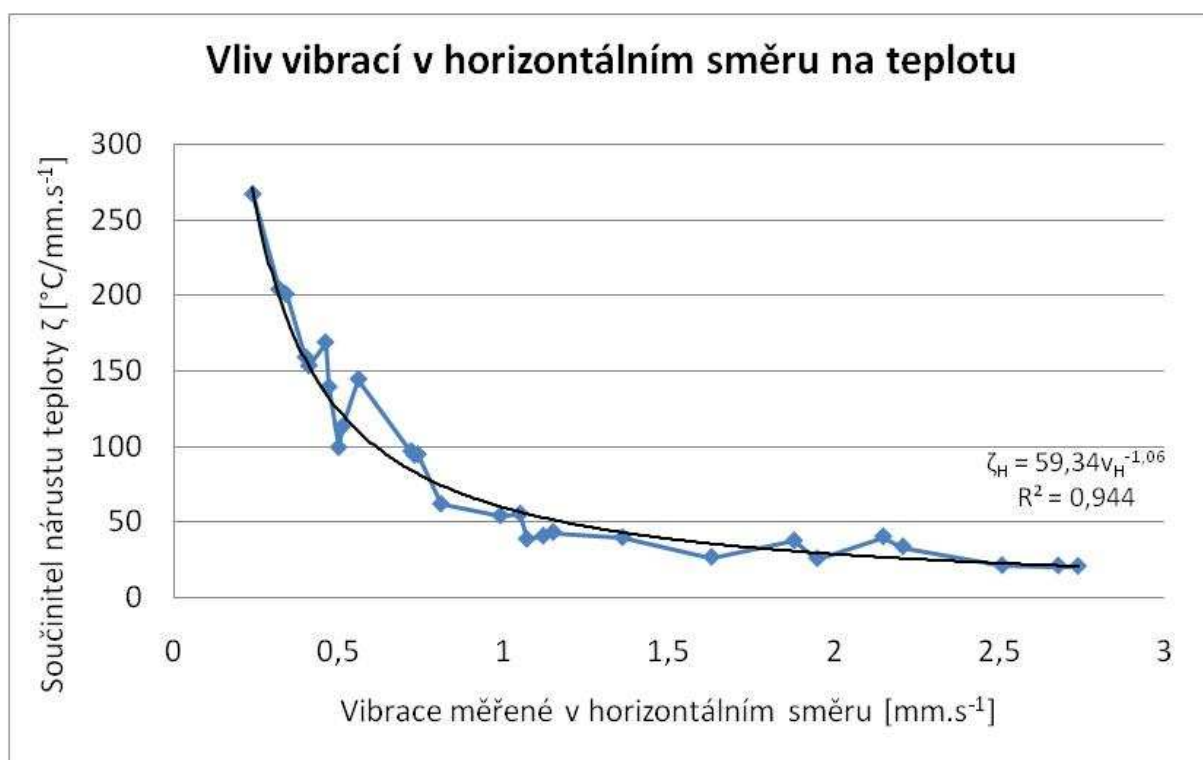
## 8.4 Zjišťování závislosti vibrací na teplotě

Při posuzování závislosti teploty kluzných ložisek na vibracích vycházíme z analýzy celkových hodnot vibrací a frekvenčních složek ve frekvenčních spektrech vibrací. V rámci analýzy celkových hodnot vibrací jsou naměřená data teplot ložisek a vibrací  $v_{H,V,A}$  v horizontálním, vertikálním a axiálním směru zpracována do tzv. součinitele nárůstu teploty  $\zeta_{H,V,A}$ , dle vztahu

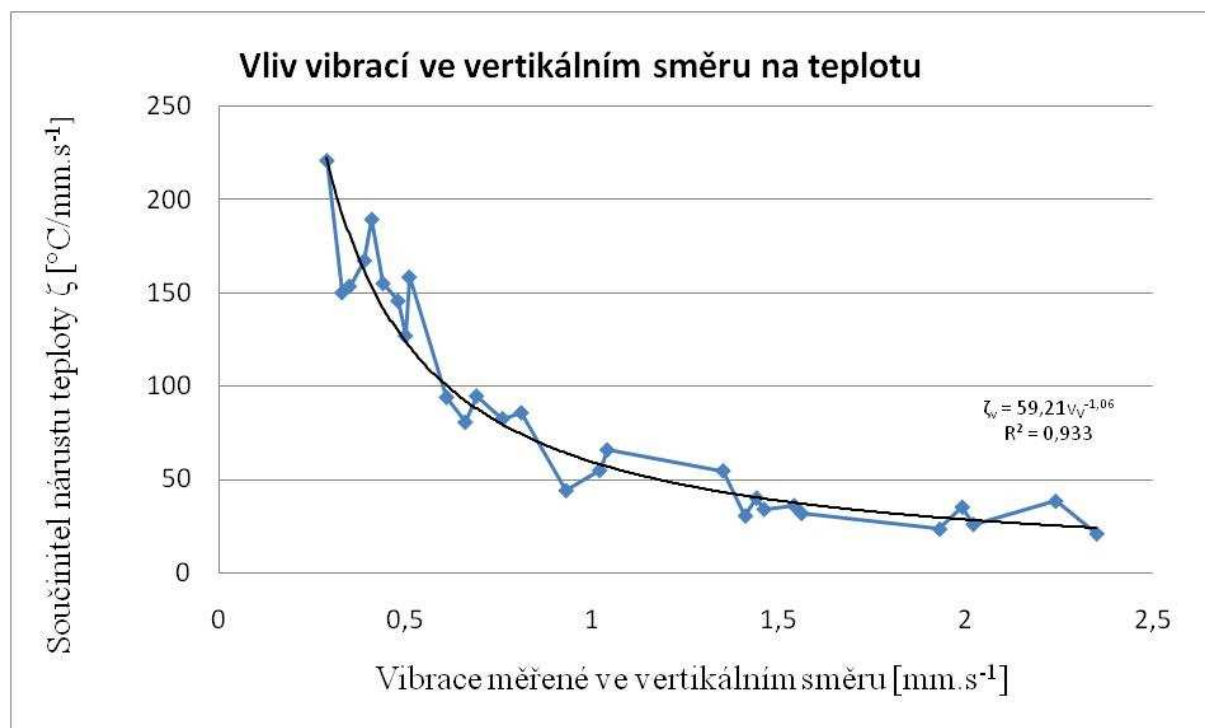
$$\zeta_{H,V,A} = \frac{T_{\text{ložiska}}}{v_{H,V,A}} \quad (8.3)$$

kde  $H, V, A$  znamenají příslušné měřicí roviny.

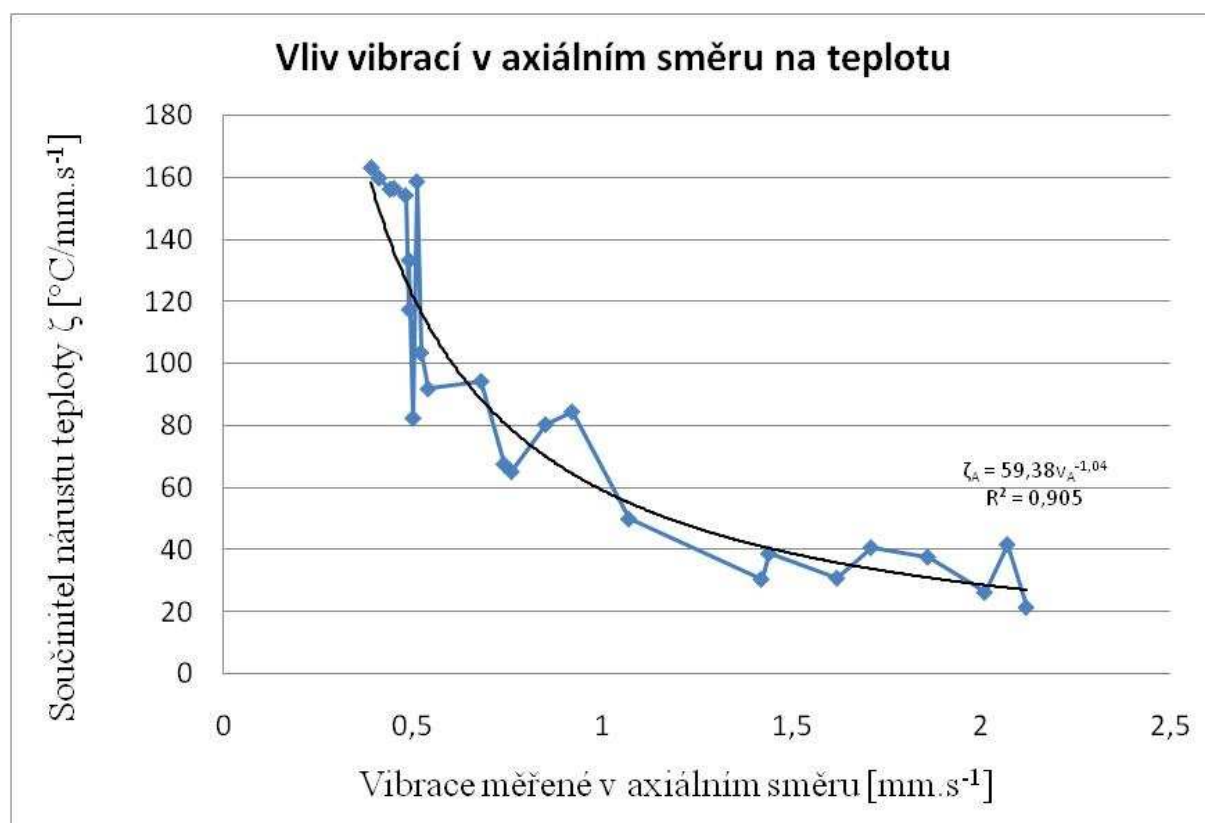
Součinitel nárůstu teploty  $\zeta$  vyjadřuje poměr vibrací na teplotě kluzného ložiska. Obr. 36, obr. 37 a obr. 38 vyjadřují závislost tohoto součinitele na velikosti vibrací v příslušných měřicích rovinách.



Obr. 36 Vliv vibrací v horizontálním směru na teplotu kluzného ložiska



Obr. 37 Vliv vibrací ve vertikálním směru na teplotu kluzných ložisek



Obr. 38 Vliv vibrací v axiálním směru na teplotu kluzných ložisek

Naměřené hodnoty vibrací a teplot jednotlivých ložisek měřených strojů jsou zpracovány do tabulky.

tab. 5.

Tab. 5 Tabulka naměřených hodnot

Stroj	Typ ložiska	T <sub>ložiska</sub>	T <sub>okolí</sub>	Teplotní součinitel	Horizontální směr	Vertikální směr	Axiální směr
TG1-L1	L1	49,5	44	0,1111	1,15	2,35	0,76
TG5-L8	L1	52,8	40	0,2424	2,51	2,02	2,01
TG9-L8	L1	53,4	50	0,0637	0,99	0,66	1,07
TG6-L1	L1	55,8	44	0,2115	2,68	1,54	1,44
TG3-L1	L1	63,6	52	0,1824	0,4	0,5	0,39
TG6-L2	L2	56,2	38	0,3238	2,74	1,02	-
TG1-L2	L2	58	38	0,3448	1,05	1,44	-
TG3-L2	L2	62,9	55	0,1256	0,41	0,76	-
TG9-L7	L2	68,7	45	0,345	0,73	1,04	0,44
TG5-L7	L2	86,3	55	0,3627	2,15	2,24	2,07
TG1-L3	L3	50	38	0,24	0,81	1,46	0,74
TG6-L3	L3	50	38	0,24	1,95	1,56	1,62
TG3-L3	L3	57,5	40	0,3043	0,51	0,61	0,49
TG9-L6	L3	65,5	44	0,3282	0,47	0,69	0,41
TG5-L3	L3	69,6	44	0,3678	0,72	0,81	1,71
TG5-L6	L3	70	44	0,3714	0,74	0,48	1,86
TG9-L3	L3	77,7	44	0,4337	0,46	0,41	0,92
TG1-L4	L4	41,2	40	0,0291	1,07	0,93	0,5
TG6-L4	L4	43,3	40	0,0762	1,63	1,41	1,42
TG3-L4	L4	45,4	40	0,1189	1,12	1,93	2,12
TG5-L2	L4	49,6	44	0,1129	0,5	0,33	0,54
TG5-L1	L4	53,8	40	0,2565	1,36	0,35	0,52
TG9-L2	L4	64,1	44	0,3136	0,24	0,29	0,68
TG9-L4	L4	65,3	44	0,3262	0,32	0,39	0,49
TG9-L1	L4	68,3	44	0,3558	0,34	0,44	0,85
TG5-L4	L4	70,4	44	0,375	1,88	1,99	0,45
TG5-L5	L4	74	44	0,4054	2,21	1,35	0,48
TG9-L5	L4	80,9	44	0,4561	0,56	0,51	0,51

Stanovení vlivu vibrací na teplotě kluzného ložiska je provedeno na základě stanovení poměrného součinitele oteplení ložiska  $\Delta T$ , který se stanoví na základě rozdílu teplot ložiska a okolí.

$$\Delta T = \frac{T_{ložiska} - T_{okolí}}{T_{ložiska}} \quad (8.4)$$

Součinitel je dále porovnáván s celkovými hodnotami vibrací v jednotlivých měřících rovinách měřených ložisek.

Následně byly z naměřených a vypočtených hodnot uvedených v tabulce sestrojeny grafy pro zjištění závislosti teploty na vibracích.

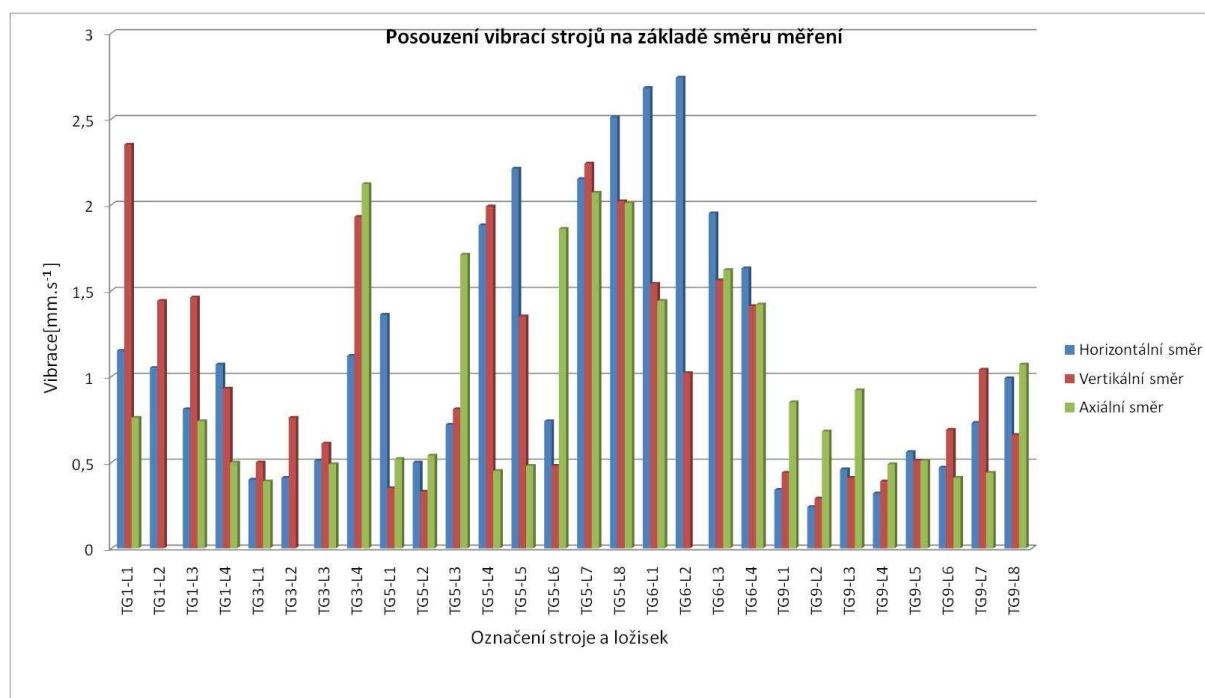
## 8.5 Vyhodnocení závislosti vibrací na teplotě

Z grafů vytvořených v editoru Excel závislosti součinitele nárůstu teploty na vibracích kluzných ložisek viz obr. 36, obr. 37 a obr. 38 je patrný stejný mocnný průběh proložené křivky analyzovanými daty, a následně získána hodnota spolehlivosti, kterou lze popsat vztahem:

$$\zeta_{H,V,A} = 59,3 \cdot v_{H,V,A}^{-1,05} \quad (8.5)$$

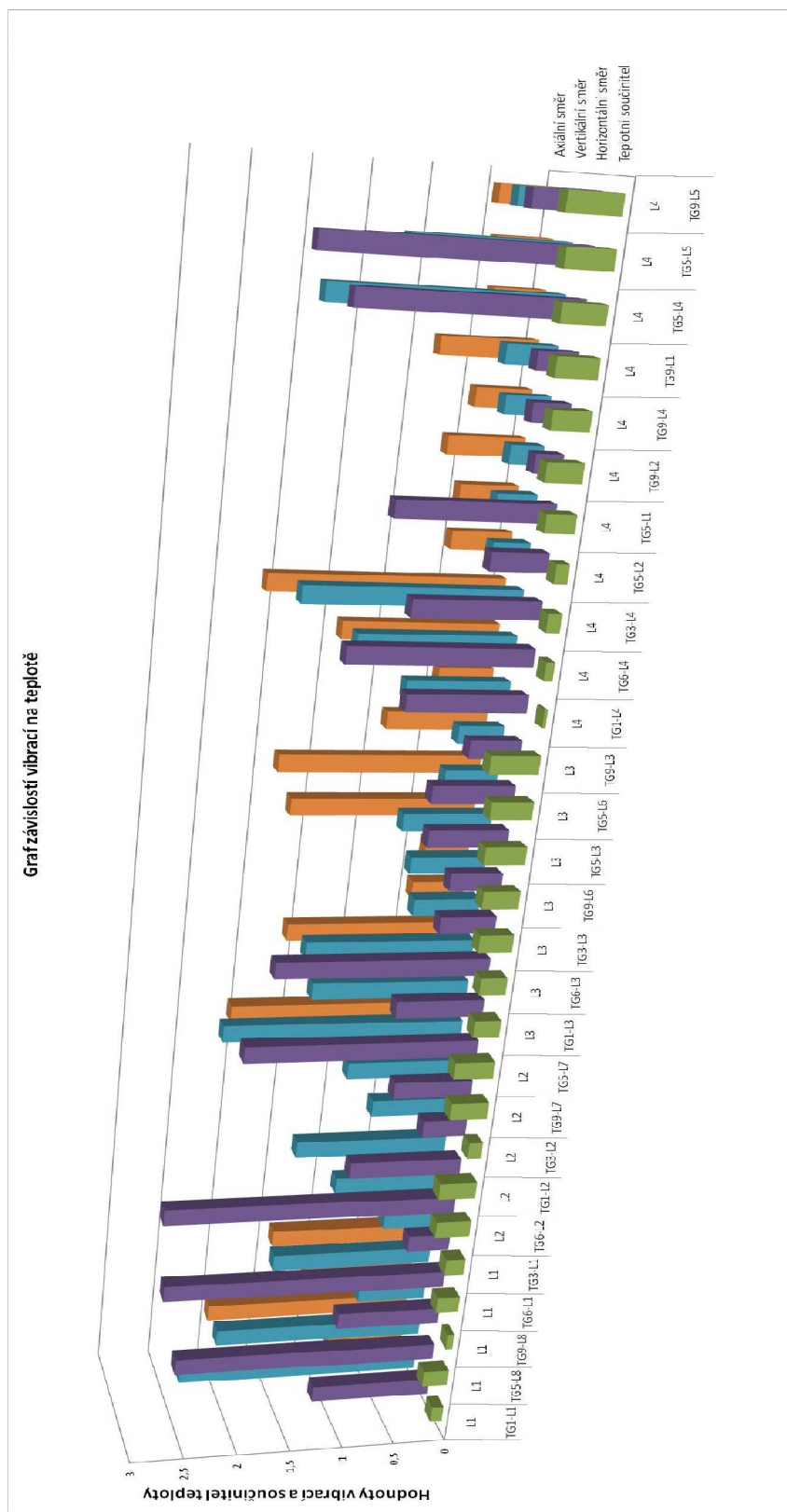
Součinitel je citlivý na změnu obou parametrů, neboť při změně celkových vibrací se změní také teplota ložiska.

Na níže uvedeném grafu jsou zobrazeny celkové hodnoty vibrací ve směru horizontálním, vertikálním a axiálním. Analýzou zobrazených dat nebyla zjištěna žádná závislost velikosti vibrací na směru měření. Rozdíly v těchto hodnotách jsou dány odlišnou tuhostí ložiskových domků a odlišnými provozními parametry měřených strojů.



Obr. 39 Velikost celkových vibrací měřené v horizontálním, vertikálním a axiálním směru





Obr. 40 3D graf závislostí vibrací na teplotě

Podrobným rozбором grafického znázornění závislosti součinitele oteplení na vibracích viz obr. 40 se takhle závislost projevuje nejcitlivěji v horizontálním směru měřených vibrací.

## 9 Závěr

Mým úkolem bylo nashromáždit a prostudovat informace týkající se termovize a vibrodiagnostiky a následně tyto zkušenosti praktikovat na diagnostiku kluzných ložisek turbogenerátorů.

V úvodní části se věnuji popisu konstrukce kluzných ložisek. Dále je zde uveden přehled rozdělení kluzných ložisek podle několika kritérií.

Při provozování kluzných ložisek dochází v důsledku nepříznivých provozních podmínek k jejich opotřebení, případně jinému poškození, a proto by se měla tato ložiska pravidelně diagnostikovat. Další bod zahrnuje nasazení multiparametrické diagnostiky pro kluzná ložiska v rámci návrhu diagnostického systému.

V další teoretické části je popis vibrodiagnostiky turbogenerátorů a hodnocení stavu stroje na základě analýzy spekter vibrací. Bylo zde podrobněji popsáno měření pomocí přístroje Adash včetně nastavení parametrů měření, volba snímače pro měření kluzných ložisek a zpracování dat. Navržený diagnostický systém včetně analýzy naměřených dat je součástí praktické části diplomové práce.

V dalším bodě je popsán princip měření povrchových teplot pomocí termokamery Fluke Ti45 IR včetně zásad správného měření.

Stěžejní částí bylo zjistit závislost vibrací na teplotu kluzných ložisek. Napsat rešerši a analýzu současného stavu včetně vytvoření výkresové dokumentace kluzného ložiska, dále pak stanovit postup měření a vyhodnocení závislosti vibrací na teplotě kluzných ložisek.

### **Ze zpracování a analýzy naměřených dat, tedy vyplývá závěr.**

Vliv vibrací na teplotu kluzných ložisek vyjádřený na základě součinitele oteplení  $\Delta T$  se projevuje nejcitlivěji v horizontálním směru měření.

Závislost součinitele nárůstu teploty  $\zeta$  na vibracích kluzných ložisek viz obr. 36, obr. 37 a obr. 38, lze popsat ve všech směrech měření mocninnou křivkou jejíž tvar je pro všechny měřící směry dán rovnicí  $\zeta_{H,V,A} = 59,3 \cdot v_{H,V,A}^{-1,05}$ . Tento součinitel je citlivý na změnu obou parametrů, neboť při jakékoliv změně celkových hodnot vibrací se změní také teplota ložiska a naopak.

**Analýza stavu strojů na základě provedené multiparametrické diagnostiky**

U turbogenerátoru TG 1 nebyly frekvenční analýzou zjištěné žádné mechanické závady. Co se týče teplot, byly naměřené vyšší hodnoty na straně turbíny. Hodnoty se pohybovali okolo 90°C, což bylo ovlivněno přestupem horké páry železem.

U turbogenerátoru TG 3 byly zjištěné patrné harmonické násobky otáčkové frekvence ve spektrech zrychlení, které jsou způsobené opotřebením kluzných ploch ložisek.

Analýzou spekter vibrací měřených na TG 5 u ložisek L1, L2 byla zjištěna nesouosost generátoru, která se ve frekvenčním spektru projevila nárůstem hodnot amplitud na druhé, třetí a čtvrté otáčkové frekvenci.

U turbogenerátoru TG 6, ložiska L4 byly zaznamenány ve spektru zrychlení harmonické násobky otáčkové frekvence ve vysokofrekvenčním pásmu. Tento jev může souviset se zvýšenými vůlemi v ložisku L4.

U turbogenerátoru TG3,5,6 tyto závady nejsou výrazné a neovlivňují tak celkovou změnu teploty kluzného ložiska.

Dále byla zjištěna závada na turbogenerátoru 9 na ložisku L2, L3, L4. Závada se projevila zvýšením teploty v důsledku přidírávání kluzného ložiska. Na ozubených kolech převodovky ve spektru zrychlení byly detekovány zvýšené amplitudy na druhé zubové frekvenci s postraními pásmy s odstupem druhé otáčkové frekvence generátoru. Což potvrzuje nesouosost hřídelů převodovky. Zvýšená teplota na inkriminovaných ložiscích je projevem vysokých špičkových hodnot amplitud vibrací.

## 10 Použitá literatura

- [1] BRYCHCY, J., *Diagnostický systém turbokompresoru*. 2004. 59 s. Bakalářská práce
- [2] GABRHELOVÁ, L., *Technický stav ložisek papírenského stroje*. 2007. 46 s. Bakalářská práce
- [3] SANETÍK, T.: *Metody měření zrychlení v technické diagnostice*. 2004. 24 s. Ročníkový projekt
- [4] HUDECZEK, M., BRYCHCY, J., GABRHELOVÁ, L.,: Protokoly z vyhodnocení vibrací. HUDECZEK SERVICE, s. r. o., Zakázkové listy
- [5] HUDECZEK, M.: *Ověřování provozuschopnosti hlubinných dobývacích strojů*. Doktorská dizertační práce, VŠB – Technická Univerzita Ostrava, Ostrava 2001. 116 s. Disertační práce
- [5] HUDECZEK, M.: *Technická diagnostika III. Presentace – Termovize*, VŠB – Technická Univerzita Ostrava, Ostrava 2008. 38 s
- [6] ŠAFR, R.: *Technika mazání*. Praha SNTL 1970, 381 s.
- [7] VINŠ, J.: *Kluzná ložiska*. Praha, SNTL 1965, 368 s.
- [8] TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika, Praha 1997, 174 s. ISBN 80-901936-1-7.
- [9] *Manuál údržby a montáže synchronního generátoru AAA Motors AB typ GBA 1250LK*. 2000. 130 s. + přílohy
- [10] *Strojírenství* [online]. [2003] [cit. 2009-02-07]. Dostupný z WWW: <<http://strojirenstvi-cz.blogspot.com/2008/10/kluzn-loiska.html>>.
- [11] *ATELIER DEK* [online]. [2005] [cit. 2009-01-17]. Dostupný z WWW: <<http://diagnostikastaveb.cz/nabidka-sluzeb/termovize-5>>.
- [12] *Odborná encyklopedie Wikipedie* [online]. [1999] [cit. 2009-01-19]. Dostupný z WWW: <[https://www.powerwiki.cz/wiki/OOEET\\_Emisivita](https://www.powerwiki.cz/wiki/OOEET_Emisivita)>.
- [13] *ELEKTRO* [online]. [2009] [cit. 2009-01-19]. Dostupný z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=26549](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26549)>.
- [14] *MM Průmyslové spektrum* [online]. [1999] [cit. 2009-01-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/poznatky-v-oblasti-hydrostatickych-lozisek>>.
- [15] *VUT Brno* [online]. [2003] [cit. 2009-01-11]. Dostupný z WWW: <[http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/Sekce\\_1.5/Mohapl\\_Martin\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/Sekce_1.5/Mohapl_Martin_CL.pdf)>.
- [16] ZIEGLER, J.- HELEBRANT, F.: *Technická diagnostika výrobních zařízení*. VŠB Ostrava, Skripta 1992, 175 s. ISBN-80-7078-111-4.

## **11 Přílohy**

Příloha 1	Protokol turbogenerátoru 1
Příloha 2	Protokol turbogenerátoru 3
Příloha 3	Protokol turbogenerátoru 5
Příloha 4	Protokol turbogenerátoru 6
Příloha 5	Protokol turbogenerátoru 9